que sais-je ?

LE SON

PAR JEAN-JACQUES MATRAS

PRESSES UNIVERSITAIRES
DE FRANCE

EXTRAIT DU CATALOGUE DE LA COLLECTION

Nos 301 à 400

301. **Histoire de l'armement** (Ch. AILLERET).
302. **La psychotechnique** (G. PALMADE).
303. **La question arabe** (P. KELLER).
304. **Histoire des doctrines politiques en France** (J. DROZ).
305. **Le riz** (A. CHEVALIER et A. ANGLADETTE).
306. **Psychologie militaire** (Paul-H. MAUCORPS).
307. **Histoire diplomatique** (L. DOLLOT).
308. **Histoire de la Chine moderne** (G. DUBARBIER).
309. **Histoire de la mise en scène** (P. BLANCHART).
310. **Histoire de l'éducation** (R. GAL).
311. **La mécanique ondulatoire** (J.-L. DESTOUCHES).
312. **Les plastiques** (J. VÈNE).
313. **Géographie botanique** (J. CARLES).
314. **Les Gallo-Romains** (E. THÉVENOT).
315. **Le capitalisme** (F. PERROUX).
316. **Les moteurs** (G. LEHR).
317. **L'énergie atomique** (A. BOUZAT).
318. **La Tunisie** (J. KLEIN).
319. **Histoire de la Belgique** (L. PIÉRARD).
320. **Les impérialismes antiques** (J.-R. PALANQUE).
321. **La chasse en montagne et au marais** (F. VIDRON).
322. **Les sentiments** (J. MAISONNEUVE).
323. **Les phénomènes vibratoires** (J. GRANIER).
324. **Langue et littérature d'oc** (A. GOURDIN).
325. **Les sports de la montagne** (F. GAZIER).
326. **La première guerre mondiale** (Gl G. LESTIEN).
327. **La littérature latine** (P. POULLAIN).
328. **Géographie de l'Europe centrale slave et danubienne** (P. GEORGE).
329. **L'économie planifiée** (J. ROMEUF).
330. **Vie et mort des étoiles** (J. GAUZIT).
331. **Le clavecin** (N. DUFOURCQ).
332. **Histoire du Poitou** (R. CROZET).
333. **Physiologie de la conscience** (P. CHAUCHARD).
334. **Histoire du Commonwealth britannique** (J. CROKAERT).
335. **Les télécommunications** (J. LAFFAY).
336. **Le blason** (G. D'HAUCOURT et G. DURIVAULT).
337. **Histoire du sport** (H. GILLET).
338. **Histoire des ordres religieux** (H. MARC-BONNET).
339. **Le sel** (J. STOCKER).
340. **Carthage** (M. HOURS).
341. **Les classes sociales** (A. JOUSSAIN).
342. **Histoire de la marine française** (L. NICOLAS).
343. **L'économie mondiale** (H. D'HÉROUVILLE).
344. **Odeurs et parfums** (J. LE MAGNEN).
345. **La Renaissance** (P. FAURE).
346. **L'éclairage** (R. JOUAUST).
347. **Le siècle de Périclès** (P. CLOCHÉ).
348. **Le pilotage des avions modernes** (G. COUTAUD et Y. TESSIER).
349. **Le travail ouvrier** (L. ALLAIN).
350. **La mémoire** (J.-C. FILLOUX).
351. **Entre la guerre et la paix** (R. CÉRÉ).
352. **La génétique des sols** (A. DEMOLON).
353. **La volonté** (P. FOULQUIÉ).
354. **Le destin de l'agriculture française** (L. BRASSE-BROSSARD).
355. **L'Islam** (D. SOURDEL).
356. **Le syndicalisme dans le monde** (G. LEFRANC).
357. **L'économie de l'Amérique latine** (J. BEAUJEU-GARNIER).
358. **La sculpture en Europe** (L. BENOIST).
359. **Les transports aériens** (M. GAUTIER et J. MARAIS).
360. **Le cheval** (R. AMIOT).
361. **Histoire de l'Amérique latine** (P. CHAUNU).
362. **Le matériel volant** (P. LEFORT).
363. **La dialectique** (P. FOULQUIÉ).
364. **La propulsion des avions** (G. LEHR).
365. **Histoire du catholicisme** (J.-B. DUROSELLE).
366. **La République argentine** (J. TOUCHARD).
367. **Le calcul mécanique** (R. TATON).
368. **Histoire du journalisme** (E. BOIVIN).
369. **Psychologie de l'enfant** (P. CÉSARI).
370. **La police scientifique** (L. LERICH).
371. **Le niveau de vie en France** (H. BROUSSE).
372. **La pomme de terre** (J. FEYTAUD).
373. **Le phosphore et la vie** (A. DEMOLON et A. MARQUIS).
374. **La viande** (H. ROUY).
375. **Histoire de la Flandre et de l'Artois** (J. LESTOCQUOY).
376. **La marine marchande** (H. CLOAREC).
377. **Le lait et l'industrie laitière** (M. BEAU).
378. **L'analyse mathématique** (A. DELACHET).
379. **La sélection des cadres** (Ch. PROVOST).
380. **La caractérologie** (G. PALMADE).
381. **Le radar** (P. DAVID).
382. **Le bois** (J. CAMPREDON).
383. **Les planètes** (P. GUINTINI).
384. **Les fourrures** (R. THÉVENIN).
385. **L'acoustique appliquée** (J.-J. MATRAS).
386. **Les doctrines économiques** (J. LAJUGIE).
387. **Le socialisme** (G. BOURGIN et P. RIMBERT).
388. **Les Mormons** (G.-H. BOUSQUET).
389. **L'état gazeux** (A. RICCI).
390. **La fécondation** (J. CARLES).
391. **Histoire des Universités** (R. AIGRAIN).
392. **Physiologie de la langue française** (G. GALICHET).
393. **Histoire de l'enseignement en France** (M. GLATIGNY).
394. **Histoire de l'Irlande** (R. CHAUVIRÉ).
395. **Le personnalisme** (E. MOUNIER).
396. **L'économie européenne** (H. D'HÉROUVILLE).
397. **L'astronautique** (L. LAMING).
398. **Histoire de l'Indochine** (A. MASSON).
399. **La biologie des sols** (J. DUCHÉ).
400. **Histoire de l'Algérie (1830-1949)** (G. ESQUER).

LE SON

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

Technique de la Radiodiffusion et de la Télévision, Eyrolles, 1937.

L'acoustique appliquée, collection « Que sais-je ? », n° 385, P. U. F., 1949.

« QUE SAIS-JE ? »

LE POINT DES CONNAISSANCES ACTUELLES

LE SON

par

Jean-Jacques MATRAS

Ingénieur général de la Radiodiffusion-Télévision française

PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1957

QUATORZIÈME MILLE

DÉPOT LÉGAL

1re édition .. .. .. 2e trimestre 1948
2e — revue .. .. 1er — 1957

TOUS DROITS
de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays

© *Presses Universitaires de France*, 1948

INTRODUCTION

Les Anciens donnaient à l'Acoustique le nom de « Musique » : c'est dire l'étroit rapport qui existait entre cette Science dont Pythagore jeta les premières bases au VI^e siècle av. J.-C., et cet art dont l'origine remonte à l'époque préhistorique.

Certes, l'étude de l'Acoustique et des propriétés des sons déborde, en un sens, le domaine proprement musical, mais ces « dépassements » sont beaucoup moins importants et beaucoup moins nombreux qu'on ne le pense généralement.

On s'imagine fréquemment que les sons utilisés en musique possèdent des propriétés communes exclusives de celles de tous les autres sons. C'est faux : les instruments de musique présentent la gamme la plus variée et la plus étendue de sons, gamme qui a d'ailleurs changé au cours des temps : certaines sonorités, certains rythmes, certaines combinaisons de son qui n'étaient pas utilisés à certaines époques le sont devenues couramment à d'autres, des instruments ont été créés, d'autres ont été modifiés, d'autres enfin ont disparu.

Il est vraiment bien difficile de tracer une frontière physique entre les sons utilisés en musique et les autres, et même en admettant qu'on puisse le faire à une époque donnée, cette frontière subirait avec le temps des changements si importants et si imprévisibles que son tracé n'offrirait pratiquement aucun intérêt. Les musiciens utilisent un grand nombre de sons et rien ne permet de penser qu'ils ne sont pas susceptibles de les utiliser tous (1).

(1) Tel est d'ailleurs le cas de la musique concrète.

Il a donc paru normal à l'acousticien de prendre pour base de ses recherches les résultats qu'avait obtenus, en général empiriquement, le musicien mais qu'avait confirmés une pratique millénaire et universelle.

C'est l'étude des sons musicaux, des hauteurs et des timbres, de la gamme et des instruments de musique, qui a permis au physicien de déceler la nature exacte des sons de toute espèce qui existent dans le monde, et de rechercher systématiquement des effets précédemment ignorés.

Ce qui distingue les sons utilisés en musique des autres sons, c'est essentiellement la façon dont ils sont utilisés : mettez un piano entre les mains d'une personne qui ne sait pas s'en servir ; elle en tirera des sons, mais pas de la musique. Avec les mêmes sons, n'importe quel exécutant pourra produire de la musique, en jouant une œuvre de Liszt ou une valse de Strauss ou même, s'il est suffisamment exercé, en « improvisant », en composant lui-même, c'est-à-dire en s'imposant, par le choix des notes utilisées, des règles identiques à celles appliquées par tous les compositeurs.

C'est l'étude de ces règles, ou mieux de ces cadres, imposés au musicien par les lois de l'harmonie musicale, c'est la recherche des motifs profonds qui y ont conduit les artistes, qui ont permis de faire progresser l'acoustique.

Il est donc utile, avant d'approfondir certains problèmes plus particuliers, comme l'audition ou la phonation, ou même de se lancer dans l'acoustique appliquée, d'avoir une idée simple mais précise, sur la nature des sons, sur leur structure, leur formation, leur action sur l'oreille et leur propagation.

CHAPITRE PREMIER

LA PROPAGATION DU SON

A) Propriétés physiques des ondes sonores

« Si l'on considère les divers cas où se produisent des sons de toute espèce », a écrit W. Herschell, il y a un siècle, « on trouve qu'ils ont divers points communs :

« 1° La détermination d'un mouvement dans le corps sonore ;

« 2° La communication de ce mouvement à l'air ou à tout autre intermédiaire qui est interposé entre le corps sonore et l'oreille ;

« 3° La propagation de ce mouvement qui passe d'une molécule à l'autre du corps intermédiaire dans une succession convenable ;

« 4° La transmission de ce mouvement du milieu ambiant à l'oreille ;

« 5° Celle qui se fait de l'oreille aux nerfs auditifs par un certain mécanisme ;

« 6° La production de la sensation. »

Faisant abstraction de ce dernier point qui n'est pas plus élucidé dans le cas particulier de l'audition, que dans le cas d'une sensation quelconque, les cinq étapes signalées par Herschell définissent encore aujourd'hui les divers chapitres de l'Acoustique musicale : on leur donne respectivement le nom de *production ; rayonnement ; propagation ; diffraction* et *perception du son.*

Nous étudierons les plus importants : propagation du son, perception du son, production du son (1).

Nature du milieu de propagation. — S'il se produisait, sur la Lune, une effroyable catastrophe, une explosion d'une intensité inouïe, les hommes pourraient la voir, mais ne pourraient l'entendre, quelle que puisse être l'ampleur du bruit provoqué.

C'est qu'entre la Lune et la Terre, il existe un immense espace vide, et *le vide est un obstacle insurmontable à la propagation du son.*

Une expérience simple met cette propriété en évidence : si l'on place une sonnerie électrique dans une cloche de verre reliée à une machine pneumatique, on constate que le bruit cesse, dès que le vide atteint une valeur suffisante. On *voit* alors la sonnerie fonctionner, on ne l'entend pas.

Le vide est-il le seul obstacle à la propagation du son ? De façon absolue, oui. En fait, divers matériaux conduisent *très mal* le son : les corps *mous* (cire, beurre, etc.) et les corps *poreux* (tissus, amiante, coton, etc.). Cette propriété est utilisée par les constructeurs qui emploient des corps poreux dans les constructions qu'ils veulent rendre insonores ; elle l'est aussi par les personnes qui, pour dormir, mettent dans leurs oreilles une boulette de cire ou un tampon d'ouate.

Par contre, de nombreux corps naturels laissent passer le son sans difficulté ; c'est d'abord *l'air*, qui baigne notre oreille normalement, et qui presque toujours est l'intermédiaire obligatoire à travers lequel nous parviennent les sons.

L'*eau* est aussi bon conducteur : les bruits qui se produisent sous l'eau sont perceptibles.

(1) Quelques notions sur le rayonnement et la diffraction sont données dans *L'acoustique appliquée* du même auteur (collection « Que sais-je ? », n° 385).

Le *béton armé* conduit remarquablement le son, ce qui désole souvent les locataires des immeubles faits avec ce matériau.

Les *canalisations d'acier* favorisent la propagation du son : si elles reçoivent un choc, le bruit correspondant est perçu, parfois très loin sur leur parcours (chauffage central).

Par contre les *canalisations de plomb* (gaz) ne conduisent pas le son : c'est que le plomb est un métal mou qui, comme la cire, réagit mal aux déformations.

Or, c'est précisément la *réaction aux déformations* qui caractérise les milieux (gaz, liquides, solides) bons conducteurs du son.

Chacun sait que l'air peut être facilement comprimé dans une pompe à bicyclette ; néanmoins pour réaliser cette compression, il est nécessaire d'appuyer sur la partie mobile de la pompe avec une certaine énergie ; il faut vaincre une certaine force. Cette force, on l'appelle *force de cohésion* ou, quand on la rapporte à une surface de 1 cm^2, *pression de cohésion ;* dans le cas de l'air, c'est la pression atmosphérique. Elle existe dans tous les corps naturels et dépend uniquement de leur nature et de leur état physique (température, pression à laquelle ils sont soumis) : c'est elle qui assure leur cohésion, qui empêche le solide de se désagréger, le liquide de sauter hors de son récipient, l'air de disparaître peu à peu dans l'espace interstellaire.

Les corps mous et poreux ont une très faible pression de cohésion : sous la moindre action extérieure, ils se déforment et ne peuvent reprendre leur position initiale.

Les corps tels que l'air, l'eau, l'acier, ont au contraire une importante pression de cohésion : il en résulte qu'ils se comportent *élastiquement.*

Si après avoir comprimé de l'air dans une pompe à bicyclette, on lâche la partie mobile, celle-ci revient aussitôt à sa position initiale et tout se passe comme si l'air n'avait jamais été comprimé. On peut répéter l'expérience indéfiniment. C'est ce retour absolu et total à l'état primitif qui caractérise le *comportement élastique des corps*.

De même que l'air, une éprouvette d'eau ou d'acier, comprimée par des forces beaucoup plus importantes, se comportera élastiquement.

C'est ainsi que, dans les conditions normales de température et de pression, pour comprimer de 1 cm. (1 %) une barre d'acier de 1 m de long et de 1 mm² de section, une force de 200 kg est nécessaire ; pour obtenir le même résultat avec une éprouvette d'eau de même dimension, une force de 2 kg suffit ; avec une éprouvette d'air : 0 gr 14.

Mécanisme de la propagation du son. — Il est alors facile de comprendre pourquoi les sons se propagent particulièrement bien dans les corps élastiques.

Pour matérialiser le phénomène, considérons une chaîne constituée par une longue série de billes reliées par des ressorts identiques et fixée à ses deux extrémités (fig. 1). Un tel système possède une force

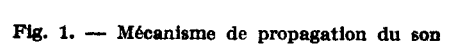

Fig. 1. — Mécanisme de propagation du son

de cohésion ; on la met facilement en évidence, en rendant libre une de ses extrémités : tout le système se contracte alors, et pour le ramener à sa longueur primitive, on doit le tirer avec une cer-

taine force qui est précisément la force de cohésion cherchée.

Ceci posé, si l'on écarte la bille A de sa position d'équilibre, en l'éloignant de B par exemple, puis en la lâchant, on constate la succession de phénomènes suivants :

La bille B est attirée vers A *avec un certain retard*, puis C vers B, D vers C, etc.

Au bout d'un certain temps, A reprend — à cause de l'élasticité — sa position primitive, puis B avec un certain retard, puis C, puis D, etc.

Ainsi donc, tout se passe comme si le mouvement, la « *perturbation* », comme on l'appelle, créée en A s'était *propagée de proche en proche* grâce à la faculté de compression des ressorts. Cette perturbation qui se propage reçoit le nom *d'onde*.

Après le passage de l'onde, le système reprend rigoureusement son état primitif.

C'est exactement l'image de ce qui se passe à l'intérieur d'un long tuyau rempli d'air, d'eau ou d'acier et dont une extrémité subit un frottement ou un choc. Cette « perturbation » se traduit par un léger mouvement du corps — invisible à l'œil en général — et engendre une onde qui se propage le long du tuyau de la façon suivante : chaque tranche infiniment mince d'air se comporte comme une spire de ressort ; grâce à l'élasticité, elle peut se déplacer, donc transmettre son mouvement à la tranche voisine ; grâce à l'élasticité, elle reprend ensuite sa position d'équilibre initial.

Après le passage de l'onde, le système reprend rigoureusement son état primitif.

Energie du son. — Le son est une *onde ;* mais toute onde n'est pas forcément sonore. Si, par exemple, la perturbation initiale est trop faible, l'action produite sur l'oreille n'est pas suffisam-

ment intense pour engendrer une impression auditive.

On conçoit que les savants aient cherché à préciser cette expression « intense » donc à *mesurer* une onde.

Pour ce faire, ils ont introduit en acoustique la notion d'*énergie*.

On sait que pour effectuer un travail quelconque, soit directement, soit indirectement, l'homme est obligé d'emprunter à l'extérieur « quelque chose qu'on appelle de l'énergie ». Cette énergie qui, en fin de compte, provient presque toujours du rayonnement solaire, se manifeste dans la nature, sous des formes très différentes, par exemple :

— sous forme mécanique (vent, chutes d'eau, marées, etc.) ;

— sous forme thermique (évaporation, combustion du charbon, du pétrole, etc.) ;

— sous forme électrique (foudre, etc.) ;

— sous forme chimique (énergie humaine et animale, etc.).

L'homme s'est, de tous temps, efforcé de domestiquer cette énergie naturelle, de la rendre utilisable, en la modifiant, en l'accumulant, en régularisant son débit ; il a même essayé d'en créer. Il s'est aperçu finalement que cette création était impossible, et qu'il ne pouvait que transformer de l'énergie déjà existante. De multiples expériences ont conduit à la loi fondamentale suivante sur laquelle est basée toute la physique : *dans un système isolé, c'est-à-dire qui n'échange aucune énergie avec l'extérieur, aucune quantité d'énergie ne se perd ni ne se crée* (1).

(1) Cette loi n'est pas rigoureusement exacte à l'échelle atomique, mais ce cas ne nous intéresse pas.

Il est donc impossible en transformant de l'énergie naturelle, d'en recueillir une quantité supérieure à celle fournie par la source.

Par contre, très généralement, on en recueille une quantité inférieure et même notablement inférieure : la différence s'est dissipée sous forme d'*énergie perdue*. Ces pertes, on s'efforce de les localiser et de les préciser, ce qui permet d'essayer de les réduire : elles se présentent bien souvent sous forme d'*énergie thermique*, de chaleur dégagée.

Or, le violoniste qui frotte son archet sur une corde tendue, le flûtiste qui souffle dans le tuyau de son instrument, le moteur d'avion qui tourne dans l'air, sont des systèmes qui transmettent de l'*énergie mécanique* (déplacement de particules) à la corde et à l'air.

Suivant un processus qui vient d'être mis en lumière, *cette énergie se propage* et atteint successivement tous les points du milieu de propagation.

Si le milieu est élastique, les pertes sont inappréciables, puisque le système reprend son état initial après passage de l'onde (même position, même pression de cohésion, même température). *Toute l'énergie de la perturbation initiale s'est donc propagée* ; elle se propagera *indéfiniment* si aucun obstacle ne vient l'arrêter.

Les corps mous et les corps poreux au contraire subissent, au passage de l'onde, des *modifications internes* (déformations permanentes, élévations de température), dues à leur absence de réaction aux influences extérieures. Les pertes, à chaque instant sont donc importantes, et l'énergie utile disparaît rapidement : les corps mous et les corps poreux arrêtent le son sous une faible épaisseur.

Célérité du son. — Il est intéressant de noter

que la théorie élastique de la propagation des ondes conduit à un résultat extrêmement remarquable :

La vitesse de propagation du son que, pour éviter toute confusion, on appelle célérité du son, est indépendante de la grandeur, de la nature et de la forme de l'énergie initiale.

Elle ne dépend que du milieu de propagation (nature, température, pression).

L'expérience vérifie très brillamment cette loi : on sait que dans l'air à 0° sous la pression atmosphérique, le son se déplace à la vitesse de *340 mètres par seconde.* Elle est rigoureusement la même, quelle que soit l'énergie initiale.

On vérifie qu'il en est de même dans l'eau ($c = 1.500$ m./sec.), dans l'acier ($c = 5.000$ m./sec.), dans le béton armé ($c = 1.000$ à 2.000 m./sec. suivant sa composition) et de façon générale dans tous les corps élastiques.

La célérité du son varie avec la température ; en particulier quand celle-ci décroît, elle décroît également. Or, certaines expériences faites à La Courtine pour étudier les *zones de silence* qui apparaissent chaque fois qu'on provoque un bruit assez intense, ont montré que le son se propageait dans les hautes couches de l'atmosphère avec une *vitesse supérieure* à sa vitesse habituelle ; parmi les hypothèses faites pour expliquer ce phénomène *a priori* étonnant — puisque ce que nous connaissons de la *stratosphère* nous la montre comme un milieu immobile et à très basse température (— 50° au moins) — on peut citer les suivantes :

— à une altitude suffisamment élevée, inaccessible à nos ballons-sondes, la température se réchauffe sensiblement et dépasse celle du voisinage de la terre ;

— il existe une zone très élevée, dans laquelle le calme stratosphérique fait place à une intense agitation et à des déplacements d'air qui peuvent atteindre des vitesses considérables.

L'étude de la haute atmosphère permettra sans doute de résoudre cette énigme.

Forme des ondes sonores. — Il est naturel de penser que la perception auditive sera d'autant plus intense que l'énergie initiale de l'onde sera elle-même plus forte. C'est ce qui est effectivement réalisé, toutes choses égales d'ailleurs.

Mais, à une même énergie initiale, peuvent correspondre des intensités de perception très différentes : un avion éloigné donne un son beaucoup moins intense qu'un avion rapproché. La distance de la source sonore joue donc également un rôle important dans l'audition du son : ce rôle n'est pas simple. Il dépend de la *forme de l'onde sonore*, c'est-à-dire de la forme de la surface atteinte par l'onde à un instant donné.

Cette forme est extrêmement difficile à déterminer : quelques exemples en donneront une idée :

Onde plane. — Soit un long tuyau métallique ; si l'on émet un son à une extrémité, on crée une onde sonore qui se propage, *sans perte d'énergie*, à l'intérieur du tuyau, quelle que soit sa longueur ; une oreille placée à l'autre extrémité perçoit donc le même son, sans affaiblissement. L'onde sonore qui se propage par tranches *planes* perpendiculaires à l'axe du tuyau est une *onde plane.* Propriété fondamentale : *l'énergie d'une onde plane reste rigoureusement constante pendant la propagation.*

Cette propriété est utilisée dans les *tuyaux acoustiques* pour transmettre les ordres ou les renseignements *à distance*, par ex. à bord des navires.

Onde sphérique. — Si, au contraire, un moteur d'avion crée une perturbation dans l'air tranquille, l'onde se propage autour de lui de la même façon dans toutes les directions. Les points atteints simultanément par l'onde sont donc situés toujours sur une sphère dont le centre est l'avion, dit *foyer* de l'onde et dont le rayon augmente régulièrement avec une vitesse égale à la célérité du son : *l'onde est dite sphérique.*

L'énergie initiale se répartit tout autour du foyer et paraît se diluer dans l'air ; le son s'affaiblit donc très rapidement, quand on s'éloigne de la source sonore.

Les propriétés des ondes sphériques ont reçu une très importante application en D. C. A. : à l'aide de grandes conques concaves, en forme d'immenses oreilles stylisées, on peut recueillir les ondes sonores émises par exemple, par un moteur d'avion et les transformer en ondes sphériques *concentriques.*

Si l'oreille ou un détecteur quelconque est placé en ce centre, toute l'énergie reçue par les conques y est accumulée et l'impression auditive est considérablement renforcée. Il est ainsi possible de repérer des avions trop éloignés pour que l'oreille puisse les percevoir directement (1).

Ondes quelconques. — La présence d'obstacles qui modifient le trajet du son, changent la forme de l'onde qui, même si elle est simple à l'origine, devient de plus en plus compliquée. Pour la déterminer, il faut connaître le comportement d'une onde sonore rencontrant un obstacle.

Réflexion et réfraction du son. — Ce comportement peut être très complètement et très simple-

(1) Procédé encore employé en 1939, au début de la dernière guerre.

ment expliqué par la comparaison suivante que j'ai déjà donnée en 1937 (1) :

« A sa rencontre avec la surface de séparation de deux milieux, une onde subit d'importantes modifications. Il est facile de les mettre en évidence par un exemple simple, celui d'un train composé d'un assez grand nombre de wagons, auxquels on accroche une locomotive : une onde est créée, que l'on pourra voir se propager *avec une vitesse constante le long du train.* Elle atteindra au bout d'un certain temps, le dernier wagon qui s'écartera de sa position d'équilibre ; or, l'énergie reçue par ce wagon ne pouvant être transmise au delà, sera retransmise à l'avant-dernier wagon, qui la transmettra au précédent, et ainsi de suite : on observera donc la propagation d'une onde dite *réfléchie*, en sens inverse de l'onde initiale dite *incidente* et à la *même vitesse.*

« En somme, s'il n'y avait aucun frottement sur les rails, frottement transformant en chaleur une partie de l'énergie reçue par chaque wagon, il y aurait propagation de l'onde de façon continue le long du train, alternativement dans un sens et dans l'autre.

« Ce frottement du train sur les rails, que l'on peut diminuer beaucoup, sans jamais le faire disparaître complètement, provoque ce qu'on appelle l'*absorption* de l'onde, qui, de ce fait, s'éteint progressivement.

« Si, au lieu d'être libre, le dernier wagon est appuyé contre un butoir rigide, un phénomène analogue se produit : le butoir ne peut se deplacer sous l'action du wagon, il refuse, en quelque sorte,

(1) DU MÊME AUTEUR : *Technique de la Radiodiffusion et de la Télévision.* T. III : *Acoustique des studios*, p. 17 et sqq.

l'énergie que celui-ci veut lui transmettre ; c'est donc encore une fois à l'avant-dernier wagon que cette énergie sera transmise : d'où propagation d'une onde *réfléchie*.

« Les deux cas qui viennent d'être examinés (dernier wagon libre et dernier wagon fixe) sont des cas extrêmes. Il est intéressant de connaître ce qui se passe dans les cas intermédiaires :

« *a)* Si le dernier wagon est relié à un wagon extrêmement léger, il ne trouve en face de lui qu'une faible résistance, subit un grand déplacement et ne transmet à ce wagon qu'une très faible partie de son énergie, le reste étant à l'origine d'une onde réfléchie. Si, de plus, le wagon léger est le premier wagon d'un train homogène, l'énergie reçue par lui donnera naissance, dans ce train, à une *onde dite réfractée ;*

« *b)* Si l'on charge progressivement les wagons du second train, l'énergie de l'onde réfractée augmentera, par rapport à celle de l'onde réfléchie ;

« *c)* Lorsque les wagons des deux trains seront de poids égaux, tout se passera comme s'il n'y avait qu'un seul train, et aucune énergie ne sera réfléchie : on dit que les deux trains sont *adaptés ;*

« *d)* Si les wagons du second train deviennent plus lourds que ceux du premier, il y aura de nouveau *désadaptation*, donc onde réfléchie. L'importance de cette onde réfléchie croîtra avec le poids des wagons du second train ;

« *e)* Si ce poids devient très important, on retombera à peu près sur le cas du train appuyé à un butoir : le dernier wagon ne pourra subir qu'un déplacement inappréciable, et presque toute l'énergie sera réfléchie.

« Donc, quand le poids des wagons du deuxième train augmente, l'énergie réfléchie commence par

décroître, passe par un minimum nul, puis croît : il existe donc deux poids pour lesquels cette énergie est la même. Par contre, l'amplitude de déplacement du dernier wagon du premier train décroît constamment et, par conséquent, peut servir à caractériser la réflexion. »

On se rend compte, par analogie, que si une onde tombe sur la surface de séparation de deux milieux qui ne sont pas dans le même état physique, elle est *presque totalement réfléchie.*

Ainsi de l'air à l'eau 0,1 % seulement de l'énergie sonore est réfractée ; de l'acier à l'eau 14 % et de l'acier à l'air environ 0,004 %.

Quand un son passe d'une pièce à l'autre, ce n'est donc *pas par réfraction* que se produit en général cette transmission du son.

Rayonnement et diffraction du son. — Le *rayonnement* et la *diffraction* sont des cas particuliers de la réfraction et de la réflexion. Ils se produisent quand les dimensions du milieu où se propage l'onde incidente sont extrêmement faibles ou au contraire considérables par rapport à celles du second milieu.

Ainsi une *corde de violon*, une *caisse de violon*, l'*extrémité d'une flûte*, la *membrane d'un haut-parleur*, un *moteur d'avion* rayonnent de l'énergie dans l'air qui les entoure.

Inversement si une onde rencontre la membrane d'un microphone, elle provoque à son voisinage une *onde diffractée* qui modifie les caractéristiques de l'onde incidente.

L'onde rayonnée et l'onde diffractée peuvent changer considérablement de forme et de valeur suivant les dimensions du milieu le plus petit, lorsque l'*onde incidente est sinusoïdale.*

B) Sons musicaux

L'homme a eu très tôt son attention attirée par les *sons musicaux :* ces sons, de timbre particulièrement agréable et suggestif, étaient primitivement fournis par les instruments à corde (lyre, harpe, etc.) et les instruments à vent (flûte, pipeau, cheng des Chinois, etc.).

Le plus simple d'entre eux est donné par le

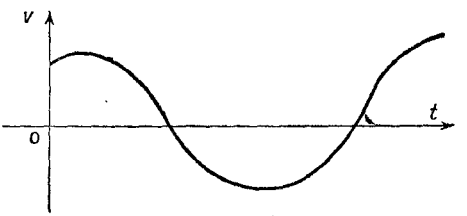

Fig. 2. — Oscillation d'un diapason (vitesse)

diapason ; on dit que son allure est rigoureusement *sinusoïdale :* la vitesse de la branche du diapason en mouvement qui produit le son augmente, passe par un maximum, décroît, change de sens et recommence à un rythme constant ; le diapason *oscille* régulièrement, périodiquement, autour de sa position d'équilibre. La courbe qui représente ces variations (fig. 2) s'appelle une sinusoïde.

La *pression de cohésion* du diapason varie de la même façon, avec cette différence qu'elle est maxima quand la vitesse est nulle et inversement.

C'est cette double allure sinusoïdale de la vitesse et de la pression qui définit les *ondes sinusoïdales.*

On sait que les sons musicaux restent musicaux, quelle que soit la distance à laquelle on les entend. C'est dire que : *une onde sinusoïdale en un point reste constamment sinusoïdale, quelle que soit sa forme.*

Cette propriété caractérise ce type d'ondes, qui en possède d'ailleurs beaucoup d'autres très particulières.

Fréquence. Effet de battement. — On appelle période T d'une onde sinusoïdale, la durée d'une oscillation complète (fig. 3). La période s'exprime en *secondes*.

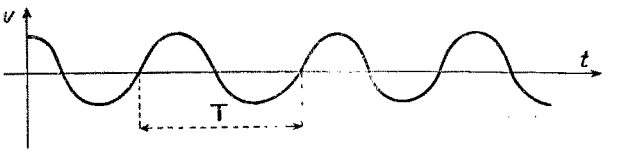

Fig. 3. — Période d'une onde sinusoïdale

La fréquence N est l'inverse de la période $\frac{1}{T}$: c'est le nombre d'oscillations par seconde. A titre d'exemple, la fréquence d'un son grave est de l'ordre de 100 à 200 *périodes par seconde*, celle d'un son aigu de 1.000 pér. p. sec. et plus (1).

On appelle *onde harmonique* d'une onde donnée, dite *fondamentale*, une onde dont la fréquence est un *multiple* de la fréquence fondamentale. Une onde donnée a une infinité d'ondes harmoniques.

Fait extrêmement remarquable : *la fréquence d'un son musical ne change pas pendant la propagation, quelle que soit la forme de l'onde.*

Au fond, c'est extrêmement heureux, sinon la musique serait impossible : chaque auditeur entendrait, suivant la place qu'il occupe, un air différent, à moins que ce ne soit une abominable cacophonie !

(1) L'unité de fréquence s'appelle aussi cycle par seconde, ou encore hertz. 1.000 cycles p. sec. = 1 kilocycle p. sec. ; 1.000 hertz = 1 kilohertz.

Lorsqu'une oreille reçoit simultanément deux sons de fréquences différentes, elle les perçoit en général distinctement. Mais si ces fréquences sont suffisamment voisines, l'impression produite change, l'oreille ne semble plus percevoir qu'*un seul son*, mais avec une intensité, une force qui varie périodiquement, qui bat à un rythme d'autant plus rapide que les fréquences composantes sont plus éloignées l'une de l'autre.

Ce *phénomène de battement*, on le conçoit, est souvent gênant, il empêche de façon courante l'utilisation simultanée de deux notes de fréquences trop voisines. Toutefois, les musiciens en ont tiré un heureux effet, dans l'orgue : on peut donner au son une allure ondulante fort agréable, en utilisant le *jeu céleste*, formé de deux fréquences très voisines qui battent entre elles.

Amplitude. Effet d'éloignement. — On appelle *amplitude de vitesse* V, d'une onde sinusoïdale, la grandeur maximum de la vitesse (fig. 4). Même

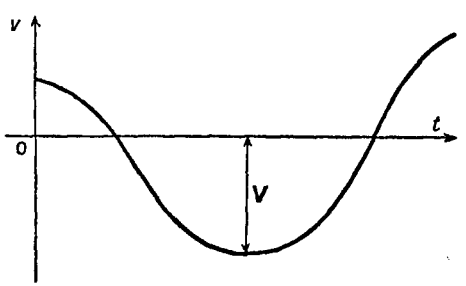

Fig. 4. — Amplitude d'une onde sinusoïdale

définition pour l'*amplitude de pression p*, qui est naturellement différente de V.

Contrairement à ce qui se passe pour la fréquence

les amplitudes varient au cours de la propagation, sauf naturellement si l'onde est plane.

Si l'onde est sphérique, ces amplitudes décroissent régulièrement lorsqu'on s'éloigne du foyer ; mais fait curieux, *la décroissance est beaucoup plus rapide pour les ondes graves que pour les ondes aiguës.*

C'est ce qu'on exprime en disant — improprement — que l'*air absorbe les basses fréquences.*

Certains musiciens se sont servis de cette propriété pour produire un effet d'éloignement : c'est le cas notamment de Richard Wagner dans le « Prélude » de *Lohengrin :* le leit-motiv du Graal est joué par les violons, dans une tonalité de plus en plus aiguë, pour indiquer son départ, son voyage, son arrivée au Ciel.

Pour donner *artificiellement* l'impression d'éloignement, on peut supprimer les fréquences basses d'un bruit ou d'un son, à l'aide d'un appareil particulier, *le filtre passe-haut* qui arrête les fréquences basses et laisse passer les fréquences élevées.

Phase. Effet de relief acoustique. — Soit deux

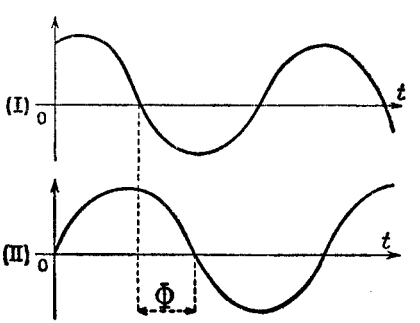

Fig. 5. — Déphasage de deux ondes sinusoïdales

ondes sinusoïdales distinctes de même amplitude et de même fréquence.

On appelle *déphasage* de l'une par rapport à l'autre leur décalage dans le temps (fig. 5).

On appelle *phase* de la vitesse d'une onde, son décalage dans le temps par rapport à une onde dont la vitesse serait nulle au temps O.

Ainsi dans la figure 5 l'onde (II) a une phase nulle, l'onde (I) a une phase Φ.

La phase se mesure en degrés (fig. 6) :

Lorsque le déphasage est nul, les ondes sont dites *en phase ;*

Lorsque le déphasage est de 180°, les ondes sont dites *en opposition de phase ;*

Lorsque le déphasage est de 90° et 270° les ondes sont *en quadrature de phase ;*

Deux ondes déphasées de 360° sont de nouveau en phase.

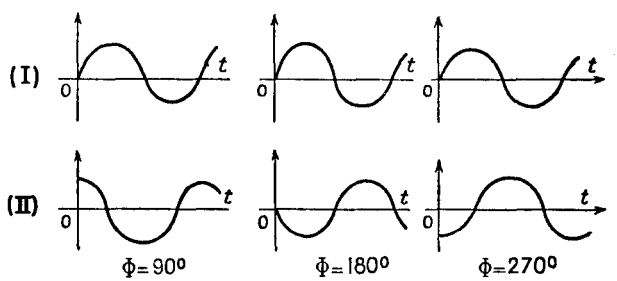

Fig. 6. — Déphasages de 90° — 180° — 270°

S'il arrive simultanément à l'oreille plusieurs ondes sinusoïdales de fréquences différentes, une modification de leurs phases n'entraîne aucun changement dans la perception : *l'oreille est insensible aux phases.*

Si par contre on fait arriver à chaque oreille,

par deux écouteurs distincts, le *même son* pris en deux points d'une salle de conférence ou d'une salle de concert, ce son arrive à chaque oreille avec un certain déphasage. Ce déphasage permet à l'auditeur d'orienter le son et lui donne par exemple une idée du mouvement du conférencier ou de l'emplacement relatif des instruments dans l'orchestre : cet *effet de relief sonore* s'obtient également, mais très atténué, si l'on remplace les écouteurs par des haut-parleurs convenablement disposés.

Longueur d'onde. — Considérons une onde sinusoïdale qui se propage avec une célérité c. Pendant qu'un point effectue une pulsation entière, il s'est écoulé un temps T^s, T étant la période de l'onde : pendant ce temps l'onde a progressé de la distance $\lambda = cT$. λ qui se mesure en *centimètres*, s'appelle *longueur d'onde.*

Dans un espace élastique sans réflexion, deux points distants de λ ou d'un multiple de λ sont *en phase.* Au contraire deux points distants de $\frac{\lambda}{2}$ ou d'un multiple impair de $\frac{\lambda}{2}$ sont en *opposition de phase.*

La longueur d'onde dépend de la *fréquence* et du *milieu de propagation.* Ainsi, dans l'air où $c = 340$ m./sec., les ondes de fréquence 340 pér. p. sec. ont une longueur d'onde de 1 m. ; les sons graves ont une longueur d'onde de quelques mètres ; les sons aigus de quelques décimètres ou même moins.

Phénomène des ondes stationnaires. — Si une onde tombe sur un mur, on sait qu'elle est presque totalement réfléchie : l'onde réfléchie ayant même fréquence que l'onde initiale et se propageant dans le même milieu a *même longueur d'onde.*

La superposition de l'onde initiale et de l'onde réfléchie donne lieu au curieux *phénomène des ondes stationnaires.*

Au voisinage du mur, très rigide, les particules d'air ne peuvent se déplacer ; la vitesse de l'onde réfléchie est donc, en ce point, en opposition de phase avec la vitesse de l'onde incidente. Il en est de même pour tous les points situés à une distance $\frac{\lambda}{2}$ ou un *multiple de* $\lambda/2$ *du mur*, chaque onde s'étant déphasée de 180° : ces points resteront comme ceux placés près du mur, *constamment immobiles.* On dit qu'ils sont à un *nœud de vitesse.*

Au contraire aux points situés à la distance du mur $\frac{\lambda}{4}$ ou un de ses multiples impairs, l'onde réfléchie et l'onde incidente sont *en phase* et ces points se déplacent avec une *amplitude double :* on dit qu'ils sont à un *ventre de vitesse.*

Les points intermédiaires vibrent avec une amplitude intermédiaire.

Le même raisonnement vaut pour la caractéristique de pression : mais on se rend facilement

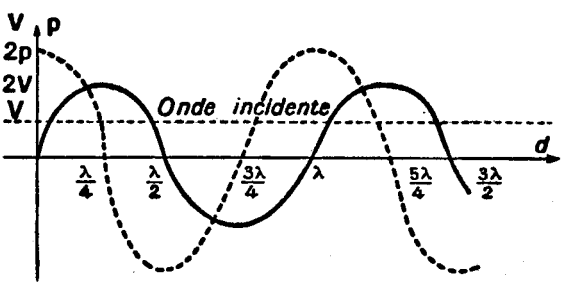

Fig. 7. — Ondes stationnaires

compte qu'à un nœud de vitesse correspond un *ventre de pression* et inversement.

Si l'on représente l'amplitude de vitesse et l'amplitude de pression d'un système d'ondes stationnaires (onde incidente et onde réfléchie sur un mur), en fonction de sa distance au mur *d*, on obtient les courbes de la figure 7.

Ce phénomène, si utile aux physiciens, est une source de gêne pour les acousticiens et les musiciens. Au voisinage des murs lisses en effet, le son paraît affaibli ou renforcé suivant qu'on se trouve à un nœud ou à un ventre de pression. En outre, ces points de renforcement ou d'affaiblissement changent avec la fréquence du son. Il en résulte qu'un son complexe, formé d'une superposition d'ondes sinusoïdales subit d'intenses déformations.

Pour les éviter, on place les exécutants, les auditeurs, les microphones à bonne distance des murs.

Par ailleurs, le phénomène des ondes stationnaires permet d'expliquer de façon simple la résonance qui, en acoustique comme en mécanique, joue un rôle capital, notamment dans la formation du son des instruments de musique.

Phénomène de résonance. — Qui n'a entendu parler du phénomène de résonance et des conséquences colossales que peut entraîner l'action régulièrement renouvelée d'une force même faible ? Tous les anciens militaires savent que lorsqu'une troupe passe sur un pont, on lui fait « rompre le pas », afin d'éviter un risque de résonance qui, dans des cas exceptionnels, s'est accompagné d'une rupture du pont.

Que l'onde exerce une action mécanique — une force — sur les corps qu'elle frappe, c'est ce qui vient d'être vu ; que cette action, lorsqu'il s'agit d'une onde sinusoïdale, donc périodique puisse

provoquer une résonance, c'est ce qui va être examiné.

Soit un espace d'air placé entre deux murs distants de d (fig. 8) ; injectons-y continuellement une onde sinusoïdale. Celle-ci va se réfléchir alternativement sur chacun des murs et chaque tranche d'air sera soumise à un nombre d'ondes croissant continuellement. Le mouvement résultant *dépend essentiellement de la distance des murs par rapport à la longueur d'onde considérée.*

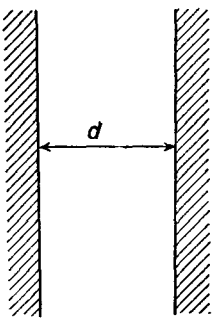

Fig. 8. — Résonance

Si $d = \frac{\lambda}{2}$, les deux murs sont sièges de nœuds de vitesse ; la tranche d'air située au milieu est à un ventre de vitesse et comme on injecte de l'air continuellement, sa vitesse va croître très rapidement et atteindra en peu d'instants une *valeur énorme.*

Si la fréquence N est, par exemple, 1.000 pér. p. sec., *en une seconde* on aura introduit mille vibrations et l'amplitude au centre sera mille fois celle de l'onde initiale.

Si d *est un multiple de* $\lambda/2$, la vitesse croît sans arrêt, mais d'autant plus lentement que d est plus grand et contient plus de demi-longueurs d'onde $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$.

Si d *est égal à* $\lambda/4$ *ou un de ses multiples impairs*, il se produit le phénomène inverse : chaque réflexion détruit l'effet de la précédente et l'amplitude résultante reste toujours *faible.*

Si d n'est pas égal à un multiple de $\lambda/4$, on obtient des périodes de croissance et de décroissance se succédant régulièrement.

Il n'y a donc *accroissement continu et rapide* d'amplitude que si d est égal à $\lambda/2$ ou à un de ses premiers multiples : on dit alors que l'air compris entre les murs *entre en résonance* pour la longueur d'onde λ ou la fréquence $N = \frac{c}{\lambda}$.

Si $d = \frac{\lambda}{2}$, d est un multiple de tous les sous-multiples de λ : si donc une résonance se produit pour la fréquence N, elle se produit également pour des fréquences 2 N, 3 N, 4 N...

Ce phénomène de résonance est extrêmement général : il ne peut être obtenu que ***s'il existe une relation entre les dimensions du corps qui la subit et la longueur d'onde qui la produit.***

Un corps donné entre donc en résonance, toujours pour une même série de fréquences dites *fréquences propres.*

Le phénomène de résonance est essentiel en Acoustique :

1° Il a conduit à construire des appareils spéciaux appelés *résonateurs* qui sont des cylindres (ou des sphères) métalliques de dimensions déterminées présentant une petite ouverture et entrant en résonance pour des fréquences faciles à calculer (fig. 9).

A l'aide de *résonateurs* étalonnés, on peut mettre en évidence la présence de certaines fréquences dans les sons complexes ;

2° La résonance gêne énormément les Acousticiens : en effet tout corps ou à peu près, peut entrer en résonance, qu'il se trouve *a priori* dans une salle ou qu'il appartienne à un appareil transmetteur (haut-parleur, écouteur téléphonique, etc.).

C'est une des plus grosses difficultés des « Industries du son », d'éliminer ces résonances ;

3° Par contre, la résonance est, en général, à la base de la production des sons, notamment des sons musicaux.

Soit une corde de violon : exerçons une pertur-

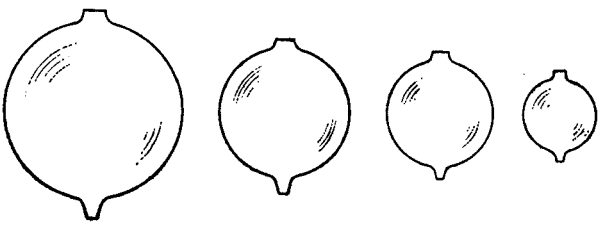

Fig. 9. — Jeu de résonateurs

bation en un de ses points. Il se produira évidemment un mouvement très complexe ; supposons — ce qui est toujours exact, comme nous le verrons au paragraphe suivant — que ce mouvement résulte de la superposition d'une infinité d'ondes sinusoïdales de toutes fréquences ; au bout de quelques périodes — une petite fraction de seconde — seules les fréquences de résonance de la corde conserveront une amplitude notable ; les autres fréquences se seront éteintes après réflexions sur les extrémités.

Le mouvement de la corde sera donc le même que si l'on n'avait introduit que la fréquence fondamentale et quelques harmoniques : *le son musical résultant est donc la superposition d'un son fondamental et d'harmoniques.*

Cette constatation simple a été généralisée grâce au génial théorème de Fourier.

L'analyse des sons musicaux. — Si l'on cherche par simple addition la forme d'une onde résultant de la superposition — de la *composition* — d'une onde sinusoïdale de fréquence N et de ses harmoniques, on constate qu'on obtient une variété extraordinaire de courbes suivant l'amplitude et le déphasage relatif des ondes composantes. Toutes ces courbes ont cependant une propriété commune : elles sont *périodiques*, c'est-à-dire qu'elles sont composées d'une succession d'arches identiques ; leur période — donc leur fréquence — est la même que celle de l'onde fondamentale.

Généralisant et inversant ce résultat, Fourier a démontré que *toute onde périodique de fréquence N pouvait être décomposée en une somme indéfinie d'ondes sinusoïdales de fréquences respectives N, 2 N, 3 N, 4 N...*

Analyser une onde périodique, c'est trouver les amplitudes et les phases respectives de la *composante fondamentale* — celle de fréquence N — et de ses *composantes harmoniques.*

En pratique, on a constaté que seuls les premiers harmoniques (cinq, dix, quinze au plus) avaient une amplitude sensible : il est donc possible toujours de décomposer une onde périodique en *quelques* composantes sinusoïdales.

Ce résultat a été d'ailleurs étendu même aux *ondes non périodiques :* toute onde peut donc être décomposée en une somme d'ondes sinusoïdales, et ses propriétés s'obtiennent à partir de celles des ondes composantes.

De là, l'intérêt de l'étude des ondes sinusoïdales et l'importance de l'analyse des ondes.

On a coutume de représenter une onde analysée par son *spectre de fréquences.*

C'est un graphique obtenu en portant en abscisses

les fréquences composantes et en ordonnées leurs amplitudes respectives (fig. 10).

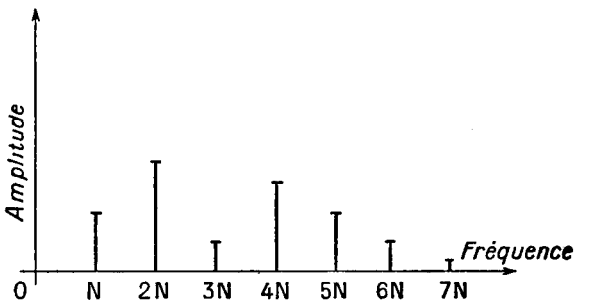

Fig. 10. — Spectre de fréquence

Pour analyser une onde, on peut utiliser divers procédés :

— un procédé mathématique, qui consiste, connaissant la caractéristique de vitesse de l'onde complexe, à calculer les amplitudes des composantes respectives ;

— un procédé physique qui consiste à faire agir l'onde sur des résonnateurs étalonnés et à étudier l'énergie résultante de ceux qui se mettent à vibrer.

Enfin, il existe un appareil spécial, le *spectromètre*, qui donne directement sur un cadran lumineux, les spectres de fréquence que l'on peut ainsi photographier et même cinématographier.

Chapitre II

LA PERCEPTION DU SON

A) L'oreille

Les ondes dont les propriétés physiques viennent d'être étudiées sommairement, sont des *ondes matérielles*. Elles se propagent dans les corps solides, liquides, ou gazeux, dont les mouvements sont directement accessibles à nos sens ; à ce titre, elles se distinguent nettement de ce qu'on a appelé pendant longtemps les *ondes électromagnétiques* — lumière, rayons X, ondes hertziennes, etc. — qui se propagent en l'absence de tout corps matériel et dont la nature est très loin d'être précisée, puisqu'on admet aujourd'hui que leur caractère « ondulatoire » ne représente qu'un de leurs aspects possibles.

« Onde matérielle » est-il synonyme d' « onde sonore » ?

Pas tout à fait.

L'oreille peut exceptionnellement percevoir des sons, sans qu'il y ait onde au sens défini ci-dessus : c'est notamment le cas lorsque l'énergie de la perturbation initiale est considérable (explosions violentes) ou que cette perturbation est provoquée par un système qui se déplace plus vite que le son (certains projectiles, extrémité des fouets), le phénomène prend alors le nom d'*onde de choc ;* il se

propage plus vite que le son, mais sa vitesse s'atténue très rapidement et il donne naissance à une onde ordinaire.

En contre-partie, certaines ondes matérielles, notamment les ondes infrasonores et ultrasonores, sont imperceptibles à l'oreille.

Bien que ces cas soient exceptionnels, ils prouvent qu'il n'y a pas identité complète entre « onde matérielle » et « onde sonore ». Il est du plus grand intérêt de préciser cette constatation, et de déterminer la correspondance qui existe entre les diverses caractéristiques physiques d'une onde et les sensations auditives.

L'oreille moyenne. — L'impression auditive dépend d'une part des *caractéristiques de l'onde*, d'autre part des *caractéristiques de l'oreille*.

L'étude de la perception du son se heurte à deux obstacles :

1° Il n'existe pas deux personnes qui aient des oreilles identiques ; on résout artificiellement cette difficulté en définissant une *oreille moyenne*, dont chaque caractéristique est la moyenne des caractéristiques d'un grand nombre d'oreilles. Cette définition est justifiée par la *remarquable constance* du résultat trouvé, quel que soit le groupe d'oreilles choisi ; elle l'est également parce que chaque oreille (à part quelques exceptions qui sont dites *anormales*, celle des sourds, par exemple) a des propriétés voisines de celles de l'oreille moyenne.

Les résultats qui seront donnés ci-dessous, sont relatifs à une oreille moyenne ; ils s'écarteront toujours, mais jamais beaucoup, des résultats que pourrait donner un seul expérimentateur ;

2° Il n'a pas encore été possible de séparer physiquement l'oreille de l'onde qu'elle reçoit.

On est donc conduit à étudier les propriétés de l'ensemble onde-oreille considéré comme un tout (1).

Description de l'oreille. — On recherche néanmoins activement la possibilité d'expliquer les propriétés physiques de l'oreille, par l'étude de sa constitution propre :

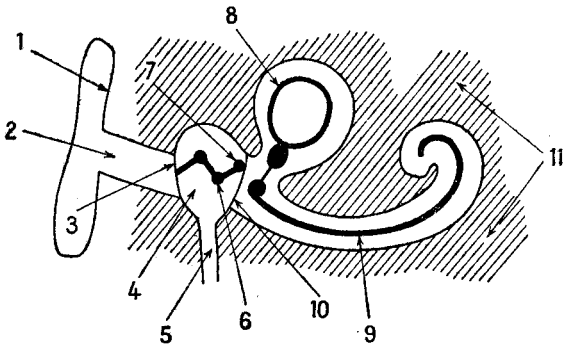

Fig. 11. — Schéma de l'oreille

L'oreille comprend essentiellement trois parties :

1° L'*oreille externe* est composée du *pavillon* (1), sorte de cornet acoustique qui joue, surtout chez les animaux, un rôle certain dans la recherche de la direction du son, et du *conduit acoustique externe* (2), sorte de résonateur de 25 mm. de long ;

2° L'*oreille moyenne* a pour organe essentiel le *tympan* (3), membrane mince élastique, à peu près ronde qui obture le conduit acoustique externe ; le tympan tendu sur un volume généralement clos est sensible aux *variations de pression provoquées* par exemple par l'arrivée d'une onde

(1) Cf. André Gribenski, *L'audition*, collection « Que sais-je ? », n° 484.

acoustique. La *caisse du tympan* (4) est une cavité irrégulière pleine d'air, en général fermée par les os du crâne, mais susceptible d'être reliée au pharynx, pendant la déglutition, par la *trompe d'Eustache* (5), ce qui permet l'égalisation fréquente de la pression de l'air de cette caisse et de celle de l'air extérieur. Il est facile de constater que lorsqu'on avale on passe par un court moment de surdité ; une rapide descente en avion provoque des bourdonnements d'oreille, dus à l'augmentation de la pression atmosphérique ; pour s'en débarrasser, il suffit de déglutir plusieurs fois de façon à ramener à sa valeur extérieure la pression de la caisse du tympan.

Les *osselets* (6) constituent une chaîne osseuse articulée, minuscules joujoux, fixés par de solides muscles d'un côté au tympan, de l'autre à une petite ouverture de l'oreille interne qu'elle obture complètement, la *fenêtre ovale* (7) ; les osselets sont des adaptateurs : ils transmettent à la fenêtre ovale les pressions reçues par le tympan après multiplication par *soixante* environ, les vitesses étant naturellement réduites d'autant ; ils protègent aussi l'oreille interne contre les perturbations trop intenses, en se déformant sous leur action ;

3° L'*oreille interne*, extrêmement compliquée, est constituée essentiellement par un sac membraneux, le *labyrinthe*, entièrement clos, rempli d'un liquide spécial l'*endolymphe*, et nageant dans un autre liquide, le *périlymphe*, contenu dans une cavité du système osseux cranien.

Le labyrinthe est composé de deux parties : les *trois canaux semi-circulaires* (8) situés dans trois plans rectangulaires et auxquels aboutissent les ramifications du *nerf vestibulaire* (ces organes président au sens de l'équilibre) ; le *limaçon* ou

cochléa (9), organe proprement dit de l'audition, qui s'enroule sur lui-même à la manière d'un escargot.

L'oreille interne prend contact avec l'oreille moyenne, grâce à deux ouvertures, la *fenêtre ovale* (7) dans laquelle s'insèrent les osselets et la *fenêtre ronde* (10).

L'ensemble de l'oreille est logée dans un os épais, le *rocher* (11) qui empêche la transmission des bruits intérieurs du corps, tels que ceux de la circulation.

Le limaçon. — C'est le limaçon, petit sac membraneux flottant dans l'oreille interne, qui constitue l'organe proprement dit de l'audition.

Malgré son extrême petitesse (2 mm 5 de long environ), il a une structure extrêmement complexe ; sa coupe est vaguement triangulaire : il est donc formé par la juxtaposition de trois membranes, dont la plus importante est la *membrane basilaire.*

Cette paroi supporte toute une série de cellules ayant l'apparence de bâtonnets qui s'appuient les uns sur les autres, figurant ainsi un minuscule tunnel : elles sont, chez l'homme, au nombre d'environ dix mille et constituent l'*organe de Corti.* Elles englobent de petites cellules ciliées — vingt à vingt-cinq mille — d'où partent les fibres nerveuses qui se réunissent en faisceau pour constituer le *nerf cochléaire* ou nerf de l'audition.

La membrane basilaire porte d'autre part, transversalement, à peu près vingt-quatre mille fibres fortement tendues qui semblent jouer un rôle capital dans la perception du son.

L'ensemble est d'une remarquable régularité, car toutes les dimensions vont en décroissant progressivement de la base au sommet du limaçon ; il est donc vraisemblable que chacun de ces microscopiques organes joue un rôle particulier dans l'audition.

Mécanisme de l'audition. — Helmholtz a émis l'idée que l'analyse des fréquences perçues par l'oreille se produisait dans le limaçon ; chacune des vingt-quatre mille fibres de la membrane basilaire entrant en résonance pour une fréquence déterminée, et communiquant sa vibration à la fibrille nerveuse la plus voisine.

En faveur de la *théorie de la résonance* d'Helmhotlz, on peut citer divers résultats expérimentaux :

Les employés des usines bruyantes ont une *surdité limitée* aux fréquences essentielles des bruits qui prédominent dans l'usine ;

Des cobayes exposés pendant plusieurs heures à des sons intenses de fréquences déterminées présentent, à la dissection, des avaries de la membrane basilaire très localisées et variables avec la fréquence ;

Un bruit gêne d'autant plus la perception d'un autre son, que sa fréquence en est plus voisine.

On a cru trouver un argument contre la théorie d'Helmholtz en calculant la tension à laquelle devaient être soumises les fibres résonnantes pendant l'audition : on a trouvé, en effet, environ 1 t au cm^2. Mais, on a pu vérifier que, si énorme soit-elle, cette tension est très supportable pour une fibre d'origine animale : les cheveux, les fils d'araignée ne cèdent qu'à une force de 3 t ou 3 t 1/2 par cm^2 ; les fils de soie, à une force de 5 t.

Plus sérieux, sont les arguments faisant état de phénomènes tels que les battements, ou la gêne produite par un son sur des fréquences même éloignées.

Ils ont conduit Baring à formuler la *théorie du téléphone* : la membrane basilaire, d'après lui, jouerait le rôle d'un central téléphonique relié au

cerveau par les fibres du nerf cochléaire dont l'ensemble constituerait un véritable câble de transmission ; l'analyse du son se produirait dans le cerveau.

La plus grosse objection que l'on puisse faire à cette théorie, c'est qu'elle n'explique rien, et, en particulier, ne tient nul compte de la structure complexe et régulière de l'oreille interne.

Sans insister sur les tentatives de conciliation entre ces deux théories extrêmes, dues à Reboul et Ewald (théorie de *l'image sonore*) ou à Békésy (théories *hydrodynamiques*), nous en viendrons tout de suite aux recherches consécutives à l'étude du mécanisme du fonctionnement des nerfs.

On sait aujourd'hui que chaque fibre nerveuse est le siège, pendant son fonctionnement, d'un phénomène de propagation électrique qui est soumis à deux lois à peu près générales :

— la *loi du tout ou rien* exprime que le phénomène électrique n'apparaît que si le stimulus extérieur a une certaine valeur minima ; et que, au-dessus de cette valeur, l'effet produit est *toujours le même* : son intensité n'est donc pas proportionnelle à l'intensité du stimulus ; c'est le *nombre* de fibres excitées qui donne l'impression d'intensité physiologique ;

— la *loi de la période réfractaire* exprime que le nerf ne répond à la cadence du stimulus que si celle-ci ne dépasse pas une fréquence voisine de 1.000 pér. p. s. ; il est donc nécessaire de laisser le nerf au repos pendant une période d'environ 1/1.000 de sec. (période dite réfractaire) pour lui permettre de récupérer ses possibilités d'action.

Ces lois sont, l'une et l'autre, en contradiction évidente avec les théories d'Helmholtz et de Baring.

Elles ont conduit Wever et Bray à exposer leur *Volley theorie* qui se résume sommairement ainsi :

— aux fréquences basses, il n'y a pas localisation, l'influx nerveux répond aux fréquences du stimulus ;
— aux fréquences élevées, au contraire, il y a localisation ;
— aux fréquences moyennes, le phénomène est intermédiaire.

La représentation de l'intensité se fait grâce à un système de relais des fibres nerveuses : aux faibles intensités, chaque fibre n'émet d'influx qu'une fois sur dix, cinq, etc. ; aux fortes intensités, elles fonctionnent simultanément et se déchargent dans le cerveau en une même salve (ou *volée*).

La Volley theorie est la plus récente des théories de l'audition ; elle serre de près le problème qui n'est cependant pas encore aujourd'hui (1957), et de loin, complètement résolu.

B) L'intensité du son

Beaucoup plus pratiques sont les résultats relatifs à l'ensemble « onde-oreille ». Lorsqu'on écoute un son quelconque, on a conscience qu'il possède trois propriétés principales : son *intensité* (il est *faible* ou *intense*), sa *hauteur* (il est *grave* ou *aigu*), son *timbre* (il est *agréable* ou *désagréable*).

L'expérience montre que le timbre d'un son sinusoïdal dit *ton pur*, produit, par exemple, par un *diapason*, reste sensiblement invariable. C'est donc la *présence d'harmoniques* plus ou moins nombreux et plus ou moins intenses qui donne au son tel ou tel timbre : plus les harmoniques sont importants, plus le son paraît plein et chaud, un ton

pur étant toujours grêle. Toutefois la présence d'harmoniques trop élevés produit des effets de sifflement et d'aigreur.

Quant au ton pur, il a une *intensité qui varie avec l'amplitude* de pression de l'onde et une *hauteur qui varie avec sa fréquence.*

Le mécanisme de cette variation est du plus grand intérêt pour le musicien et l'acousticien.

Sensibilité de l'oreille. — Une oreille moyenne ne peut *percevoir* une onde sinusoïdale que si sa fréquence est comprise entre 15 et 20.000 pér. p. sec. environ.

On appelle *seuil d'audibilité*, la courbe qui donne pour chaque fréquence l'énergie exprimée en *watts*, à partir de laquelle, le son devient audible.

Le *seuil de douleur* donne l'énergie à partir de

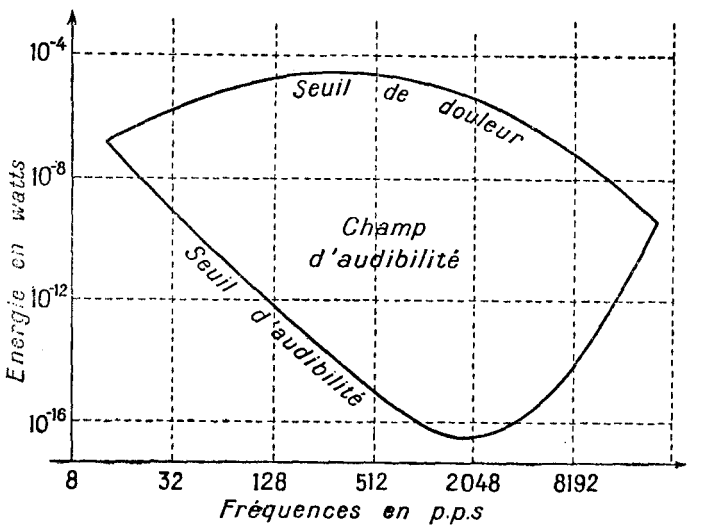

Fig. 12. — Champ d'audibilité

laquelle l'oreille n'éprouve plus une sensation sonore, mais une impression douloureuse.

Ces deux seuils limitent le *champ d'audibilité* de l'oreille (fig. 12). Ces trois caractéristiques varient énormément avec la fréquence : c'est aux fréquences moyennes (500 à 5.000 pér. p. sec.) que l'oreille est la plus sensible et présente un champ d'audibilité maximum : le rapport des énergies extrêmes audibles (10^{-17} watts à 10^{-4} watts) atteint *dix mille milliards*.

Mesure de la sensation d'intensité. — On a constaté que, *dans la zone centrale* du champ d'audibilité, *la sensation d'intensité était sensiblement égale au logarithme de l'énergie excitatrice* (loi de Weber-Fechner).

On a donc été conduit à définir l'intensité I d'un son d'énergie P, par la formule :

$$I - I_0 = \text{logarithme}\,\frac{P}{P_0}$$

P_0 étant, par définition, l'énergie donnant une intensité I_0.

Par convention internationale, on prend pour intensité *zéro* ($I_0 = 0$), celle qui correspond au seuil d'audibilité à la fréquence 1.000 pér. p. sec. On a alors $P_0 = 10^{-16}$ watts.

On définit ainsi une *échelle* des intensités qui varie suivant la base du logarithme choisi, à la manière d'une échelle thermométrique suivant le choix des points fixes.

L'échelle usuelle choisie définit le *décibel*, tel que :

$$I\,\text{décibels} = 10 \log_{10} \frac{P}{10^{-16}}$$

Comme P varie à peu près de 10^{-17} à 10^{-4} watts, les sons audibles s'étendent sur une marge d'intensité d'environ *130 décibels.*

En fait, lorsqu'on approche des bords du champ d'audibilité, la sensibilité de l'oreille décroît : à

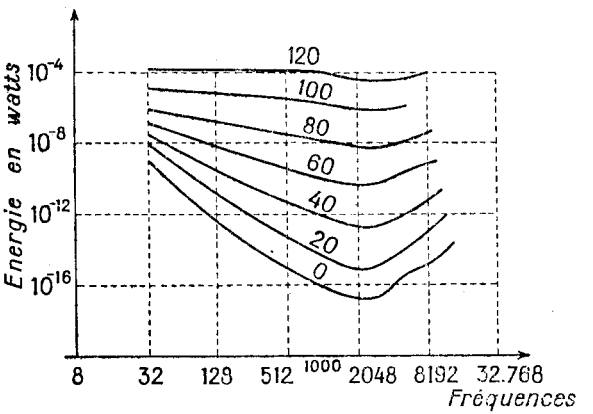

Fig. 13. — Courbes de Fletcher

une même énergie, ne correspond donc plus la même sensation d'intensité.

Il appartenait à *Fletcher* et *Munson* de tracer les *courbes d'égale sensation* (fig. 13).

Ces courbes ont été numérotées par leurs auteurs, en supposant qu'à la fréquence 1.000 pér. p. sec. la formule logarithmique s'applique intégralement ; les sensations sont alors exprimées en *phones.*

Hypothèse évidemment fausse — notamment aux faibles intensités — que divers auteurs ont

cherché à éliminer en numérotant différemment les courbes d'égales sensations (1).

Quoi qu'il en soit, le phénomène physiologique reste inchangé, et il est lourd de conséquences : en effet, contrairement à ce que l'on croit couramment, *une modification de l'intensité moyenne d'écoute altère le timbre musical.*

Ecouté à la T. S. F., c'est-à-dire dans une pièce de faibles dimensions, un concert de grand orchestre paraîtra toujours *pauvre en notes graves*, si l'on ne prend soin de renforcer leur intensité apparente, soit en rapprochant du microphone les instruments à son grave (contre-basses, contre-bassons, grosse caisse, etc.), soit en introduisant sur le circuit électrique un correcteur appelé *relève-graves.*

C) Hauteur du son et gammes

La loi de Weber-Fechner donne pour la mesure de la hauteur d'un ton pur de fréquence N la relation :

$$H = \log \frac{N}{N_0}$$

N_0 étant la fréquence de référence correspondant à la hauteur O. Le rapport $\frac{N}{N_0}$ s'appelle *intervalle musical* des fréquences N et N_0.

On utilise deux unités courantes de hauteur :

— L'*octave* unité théorique, obtenue en prenant 2 pour base du logarithme. (Ainsi deux sons dits couramment « à l'octave », c'est-à-dire dont la

(1) La plus connue des échelles ainsi définies est l'échelle des *sones*. Par convention 40 phones = 1 sone ou 1.000 *millisones*. A titre indicatif, 10 phones = 15 m. s. ; 20 ph. = 100 m. s. ; 30 ph. = 400 m. s. ; 60 ph. = 4.000 m. s. ; 80 ph. = 20.000 m. s. ; 100 ph. = = 100.000 m. s. ; enfin 120 ph. = 600.000 m. s. environ.

fréquence de l'un est le double de celle de l'autre ont une différence de hauteur de 1 octave) ;

— Le *savart*, unité pratique, qui est la millième partie de l'unité obtenue en prenant 10 pour base du logarithme :

$$H_{savarts} = 1.000 \log_{10} \frac{N}{N_0}$$

On vérifie facilement que : 1 octave = 300 savarts.

Hauteur des sons musicaux. — Les sons musicaux qui sont périodiques mais non sinusoïdaux donnent également à l'oreille une *sensation de hauteur parfaitement définie.*

Si l'on décompose un tel son en ses composantes de Fourier — fondamentale et harmoniques — on constate que *la sensation de hauteur qu'il produit est la même que celle de la composante fondamentale*, même si l'amplitude de celle-ci est relativement faible par rapport à celle des harmoniques.

Au cours de la propagation d'un son musical, sa hauteur reste invariable.

L'utilisation d'instruments de dimensions définies — flûte ou lyre — a conduit les Anciens à limiter le nombre de hauteurs utilisées en musique (le violon, qui permet de faire varier la hauteur d'un son de façon continue, n'existait pas dans l'Antiquité).

Cette limitation est à l'origine *des notes de musique :* on appelle ainsi les hauteurs ou les fréquences employées par les musiciens.

Le problème de leur détermination n'est pas simple : il a soulevé des polémiques ardentes dont on trouve les premières traces à l'époque de Platon et qui semblent rebondir de nouveau aujourd'hui.

Une notion semble pourtant s'être imposée de tous temps et en tous pays : *celle d'octave.*

Que ce soit en Grèce, en Chine, en Egypte, au Moyen Age ou de nos jours, les sons dont les fréquences sont de rapport 2 ont toujours porté le même nom, et, en raison de leur étroite parenté ont appartenu au même ensemble musical.

Pour définir cet ensemble, il suffit donc de choisir les notes de musique comprises dans l'intervalle d'une octave. La suite de ces notes a reçu le nom de *gamme.*

Il existe plusieurs gammes — dont les plus célèbres sont la gamme de Pythagore, la gamme d'Aristoxène ou de Zarlin, la gamme chromatique bien tempérée.

La gamme chromatique bien tempérée. — C'est la gamme universellement admise de nos jours. Les fréquences fondamentales de chaque note s'obtiennent à partir d'une fréquence initiale N_0 par multiplication par le facteur $\sqrt[12]{2^n}$, n prenant les valeurs entières... — 1, 0, 1, 2, 3...

Exprimée en savarts, la différence de hauteur de deux notes consécutives de la gamme tempérée est de *25 savarts.* Cet intervalle prend le nom de *demi-ton tempéré.* Le *ton tempéré* a une valeur de 50 savarts.

Les musiciens utilisent dix gammes successives, exactement cent vingt et une notes qui couvrent d'ailleurs à peu près complètement l'ensemble des sons de l'extrême grave à l'extrême aigu. Les notes de chaque gamme, comptées à partir de la note de base, reçoivent le même nom ; ce sont successivement :

1. *ut* ou *do* (1) ou *si* dièse (*si* ♯).
2. *ut* dièse (*ut* ♯) ou *ré* bémol (*ré* ♭).
3. *ré.*

(1) Le terme *do* plus sonore est réservé aux études de solfège ; le terme *ut*, son synonyme, est seul utilisé dans le langage théorique.

4. *ré* dièse (*ré* ♯) ou *mi* bémol (*mi* ♭).
5. *mi* ou *fa* bémol (*fa* ♭).
6. *fa* ou *mi* dièse (*mi* ♯).
7. *fa* dièse (*fa* ♯) ou *sol* bémol (*sol* ♭).
8. *sol.*
9. *sol* dièse (*sol* ♯) ou *la* bémol (*la* ♭).
10. *la.*
11. *la* dièse (*la* ♯) ou *si* bémol (*si* ♭).
12. *si* ou *ut* bémol (*ut* ♭).

Quand on veut définir une note avec précision, on l'affecte d'un indice qui indique le numéro de la gamme à laquelle elle appartient.

Exemple : La note la plus grave utilisée en musique est le *ut*-1 qui correspond à une fréquence de vibration voisine de 16 pér. p. sec. ; la note la plus élevée est le ut 9 qui correspond à 16.700 pér. p. sec. Ces deux notes n'existent que dans un seul instrument, d'ailleurs le même : l'orgue.

La gamme chromatique tempérée présente en musique un énorme avantage : elle résout parfaitement le *problème de la transposition.*

Par contre elle n'est parfaite ni au point de vue *mélodique*, ni au point de vue *harmonique.*

Malgré ces imperfections — très relatives — elle s'est imposée vers le milieu du XVIII^e^ siècle, sous l'influence d'une œuvre magistrale de J. S. Bach, *Le Clavecin bien tempéré.*

Transposition. — Qu'est-ce que transposer un air ?

Soit à chanter une mélodie, c'est-à-dire une succession de notes bien déterminées ; il peut arriver qu'un chanteur arrivé au son le plus aigu ait peine à l'émettre : le son est trop haut pour sa voix.

Le chanteur a un moyen de remédier à cet incon-

vénient, c'est de partir d'une note plus grave que celle dont il était parti primitivement.

C'est un résultat d'acoustique physiologique bien connu que :

1° en changeant la note initiale d'une mélodie, il est possible de constituer une nouvelle mélodie donnant à l'auditeur l'impression du même air que celui de la mélodie primitive ;

2° les fréquences des notes utilisées dans la nouvelle mélodie sont *proportionnelles* aux fréquences des notes composant la mélodie primitive, ou, ce qui revient au même, les hauteurs sont décalées d'un même nombre de *savarts*.

La nouvelle mélodie sera dite *transposée* de la première et l'opération qui consiste à passer des notes de l'une à celles de l'autre s'appelle la *transposition*.

Utilisée de tous temps pour l'accompagnement, la transposition est devenue sous le nom de « modulation » un moyen usuel et puissant de la musique.

Le fait que toutes les notes de la gamme chromatique tempérée constituent une progression géométrique, rend le problème de la transposition particulièrement simple avec cette gamme.

Il suffit, en effet, pour transposer un air de décaler chacune des notes qui le constituent de 1, 2, 3 ou n notes, c'est-à-dire de 25, 50, 75 ou 25 n savarts.

Exemple :

Air primitif..... Ut_3 Mi_3 Sol_3 Ut_4

Air transposé ..... $Ut_3^\sharp$ Fa_3 $Sol_3^\sharp$ $Ut_4^\sharp$

Qualités mélodiques et harmoniques des sons. — La gamme chromatique tempérée, a-t-on dit, n'est

parfaite ni au point de vue mélodique, ni au point de vue harmonique.

« Les musiciens modernes admettent actuellement que les sons qu'ils utilisent peuvent être entendus de deux manières : *mélodiquement* ou *harmoniquement.*

« On appelle *mélodie* la succession de plusieurs sons procédant isolément, c'est-à-dire un à un.

« *L'harmonie* consiste dans l'émission de plusieurs sons frappés ensemble... *Un accord* est la réunion de plusieurs sons frappés ensemble » (d'après l'*Encyclopédie* de Lavignac).

Dans l'un ou dans l'autre cas, l'emploi (successif ou simultané) de deux ou plusieurs notes produit à l'oreille une impression qui dépend essentiellement des notes utilisées. Cette remarque est évidemment fondamentale, c'est la base même de tout l'art musical.

De tous temps, physiciens et musiciens se sont attachés à préciser, mieux à *classer*, les différentes impressions produites à l'oreille par cet ensemble (successif ou simultané) de deux notes.

Malgré la difficulté du problème, due principalement à son caractère plus artistique que scientifique, certains résultats universellement adoptés ont été obtenus.

La plupart d'entre eux avaient été acquis dès l'Antiquité, mais la théorie des vibrations a permis de leur donner, il y a quelques siècles, une base mathématique.

La théorie de Fourier nous apprend, en effet, qu'un son musical est décomposable en une somme de vibrations sinusoïdales.

On conçoit fort bien dans ces conditions que les notes dont les fréquences fondamentales sont précisément rigoureusement égales à l'une des fré-

quences harmoniques d'une note donnée, possèdent avec cette dernière une « *affinité* » particulière.

On conçoit également que cette affinité, cette « *parenté* » soit d'autant plus étroite que les deux notes ont le plus grand nombre d'harmoniques communs.

C'est trouver théoriquement ce que l'expérience a donné depuis des millénaires, à savoir d'abord et essentiellement que deux notes dont les fréquences fondamentales sont dans le rapport 2 « *se marient* » dans les meilleures conditions possibles.

On a donné à l'intervalle musical (rapport des fréquences) qui sépare ces deux notes le nom d'*octave*.

Sons consonants et dissonants. Dureté. — La décomposition d'une note de musique en sa vibration fondamentale et en ses harmoniques permet de trouver toute une série de notes ayant avec la note initiale une parenté certaine, bien que moins rapprochée que la note dite « à l'octave » : on dit que ces notes forment avec la note initiale des *sons consonants*.

On admet conventionnellement que sont consonants les sons de fréquences relatives :

2 et 3	qui définissent	l'interv.	de	*quinte*	3/2
3 et 4	—	—	—	*quarte*	4/3
4 et 5	—	—	—	*tierce*	5/4
3 et 5	—	—	—	*sixte*	5/3
5 et 6	—	—	—	*tierce mineure*	6/5
5 et 8	—	—	—	*sixte mineure*	8/5

Les sons consonants donnent à l'oreille une impression de calme, de repos, de fini.

Les musiciens ont donné le nom de sons *dissonants* à des sons qui donnent à l'oreille une impression d'attente, d'indéfini ; on dit qu'ils sont portés

à *se résoudre* vers des sons consonants, c'est-à-dire qu'ils appellent, qu'ils attirent après eux des consonances susceptibles de terminer la phrase musicale ; on peut remarquer que, dans certains cas, le caractère consonant ou dissonant d'un intervalle dépend de son utilisation musicale : l'intervalle de *quarte* est mélodiquement consonant et harmoniquement dissonant.

Les physiciens ont constaté que :

Un intervalle est d'autant plus consonant que le rapport des fréquences composantes est réductible à une fraction plus simple.

On vérifierait facilement que les intervalles des sons dissonants sont réductibles à des fractions telles que 10/9, 15/8, 9/8...

Encore est-il indispensable de savoir avec quelle précision cette loi est valable. L'acoustique physiologique donne la réponse suivante à cette question :

Le caractère consonant ou dissonant d'une association de sons persiste lorsque le rapport des fréquences des sons correspondants est non pas égal mais voisin d'une fraction simple ou relativement simple. Plus la fraction est simple (autrement dit plus le son est consonant), plus la précision de l'oreille est grande.

Il importe d'appeler ici l'attention sur une curieuse propriété de l'oreille qui va être précisée sur un exemple :

Soit l'accord consonant de tierce (intervalle musical 5/4) ; l'impression produite par deux sons dont le rapport de fréquences est égal à $5/4 \pm \varepsilon$ est une impression de fini, de repos, qui caractérise une consonance (si ε est suffisamment petit). Mais cette impression elle-même n'est pas tout à fait la même que lorsque $\varepsilon = 0$ et elle change quand ε varie, bien que le caractère consonant subsiste dans tous les cas. Les musiciens ont donné, pour les

accords, le nom de *dureté* à cette différence d'impression que produit à l'oreille l'accord parfait ($\varepsilon = 0$) et l'accord approché (ε petit) : plus un accord est *dur*, moins il est satisfaisant à l'oreille.

Plusieurs siècles d'études sur cette question ont montré que :

Si la dureté exprimée en savarts, est inférieure à 2, elle est pratiquement imperceptible à l'oreille (sauf dans des conditions d'écoute particulières).

Si la dureté est supérieure à 8 ou 10, l'accord perd son caractère de consonance.

Une dureté de 3 à 8 savarts est nettement perceptible, mais l'impression qu'elle produit varie considérablement suivant les conditions d'écoute et le degré de sensibilité de l'oreille des auditeurs.

Comme les rapports de fréquences de deux notes quelconques de la gamme chromatique tempérée ne sont pas *réductibles* à des fractions simples (l'octave mise à part), puisqu'ils sont égaux de façon générale à $\sqrt[12]{2^n}$, les accords correspondants sont *durs*.

Mais cette dureté est généralement faible, comme le montre le tableau suivant :

Intervalle	Sa valeur en savarts	Intervalle théorique le plus voisin	Sa valeur en savarts	Dureté de l'accord tempéré en savarts
Ut-sol	175	Quinte 3/2	176	1
Ut-fa	125	Quarte 4/3	125	0
Ut-mi	100	Tierce 5/4	97	3
Ut-la	225	Sixte 5/3	222	3

Les accords tempérés de quinte et de quarte sont donc extrêmement satisfaisants ; par contre, les accords tempérés de sixte et de tierce possèdent une dureté non négligeable : c'est eux que les

acousticiens du XVIII^e siècle appelaient des « loups ».

Remarque fondamentale. — Les résultats qui viennent d'être énoncés permettent de démontrer très facilement l'incompatibilité mathématique des notions de transposition et de consonance.

Or, il vient d'être vu que, dans le cas de la gamme tempérée, on renonçait délibérément à avoir des consonances parfaites. Mais on conçoit très facilement — et la date récente d'adoption de la gamme tempérée le prouve — que ce renoncement n'est pas naturel et qu'il a été nécessaire aux musiciens de faire un gros effort pour y aboutir.

C'est cet effort que traduisent les indécisions et les hésitations dans le choix d'une gamme et les adoptions successives ou simultanées de divers types de gammes.

La gamme de Pythagore. — C'est une gamme *engendrée par quintes successives*, c'est-à-dire dont la fréquence de chaque note s'obtient en multipliant la fréquence de la précédente par 3/2.

On obtient la suite : 2/3 1 3/2 9/4 27/8 81/16 243/32 (limitée à sept notes, chiffre admis à cette époque par tous les musiciens).

Toutes ces notes étant ramenées dans la même octave, on obtient la suite qui définit la gamme de Pythagore : 1 9/8 81/64 4/3 3/2 27/16 243/128. A quelques savarts près (5 au maximum), on obtient les sept notes suivantes de la gamme tempérée : *ut ré mi fa sol la si.*

Exprimés en savarts, les écarts 2 à 2 des notes de la gamme de Pythagore sont égaux à : 51-51-23-51-51-51-23.

L'écart de 51 savarts s'appelle *ton pythagoricien* (il excède un peu le ton tempéré) ; l'écart de 23 savarts est le *limma*, il est inférieur au demi-ton pythagoricien.

Que penser de la gamme de Pythagore ?

1° *Qualités harmoniques et mélodiques.* — Le tableau suivant donne la dureté exprimée en savarts des principaux accords que l'on peut faire avec cette gamme :

Intervalle pythagoricien	Sa valeur en savarts	Intervalle théorique le plus voisin	Sa valeur en savarts	Dureté de l'accord pythagoricien
Ut-sol	176	Quinte 3/2	176	0
Ut-fa	125	Quarte 4/3	125	0
Ut-mi	102	Tierce 5/4	97	5
Ut-la	227	Sixte 5/3	222	5

Du point de vue harmonique, la gamme pythagoricienne est nettement défectueuse.

En est-il de même du point de vue mélodique ? Les considérations théoriques déjà formulées sembleraient conduire à une réponse affirmative.

Mais certaines expériences semblent prouver au contraire que les violonistes improvisent en utilisant la gamme de Pythagore : il est bien difficile de conclure !

2° *Transposition.* — Si l'on appelle T le ton pythagoricien et *t* le limma, la gamme de Pythagore est constituée par la suite d'intervalles : T T *t* T T T *t*, en prenant comme première note ou *note de base* ou *tonique*, la note *ut*.

Transposer la gamme, c'est trouver une suite de notes caractérisées par la même suite d'intervalles, avec une tonique différente. Il est naturel de prendre d'abord comme tonique *fa* et *sol* qui sont particulièrement consonants avec *ut* : c'est avec ces notes que l'on obtient les résultats les plus simples.

Du tableau :

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
T	T	*t*	T	T	T	*t*	

fa	*sol*	*la*	[*si*]	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	
T	T	T	*t*	T	T	*t*		

sol	*la*	*si*	*ut*	*ré*	*mi*	[*fa*]	*sol*	
T	T	*t*	T	T	*t*	T		

On tire immédiatement :

a) On aura effectué la transposition de la gamme en *fa*, en substituant à la note *si* une nouvelle note de fréquence inférieure, telle que l'intervalle qui la sépare du *la*, sera *t* et du *ut*, T.

Faire cette substitution s'appelle *bémoliser la note* si ; la nouvelle note ainsi créée s'appelle *si* bémol ou *si* ♭.

b) On aura effectué la transposition de la gamme en *sol*, en substituant à la note *fa* une nouvelle note de fréquence supérieure, telle que l'intervalle qui la sépare du *mi*, soit T et du *sol*, t.

Faire cette substitution s'appelle *diéser la note* fa ; la nouvelle note ainsi créée s'appelle *fa* dièse ou *fa* ♯.

En prenant comme toniques successives, toutes les notes de la gamme, on est amené à introduire six nouvelles notes :

ut ♯ *ré* ♯ *fa* ♯ *sol* ♯ *la* ♯

et *si* ♭, qui correspond à la note *fa*, laquelle joue un rôle tout à fait particulier dans la gamme de Pythagore.

Connaissant la valeur de T = 51 savarts et de *t* = 23 savarts, on voit immédiatement que la note diésée (ou bémolisée) a une hauteur supérieure (ou

inférieure) de 28 savarts, à celle de la note primitive : cet intervalle s'appelle l'*apotome pythagoricien.*

Ces considérations justifient les noms de dièse et de bémol donnés à certaines notes de la gamme tempérée ; en effet, à quelques savarts près, les notes *Ut* ♯... de la gamme de Pythagore ont même fréquence que les notes *Ut* ♯... de la gamme tempérée.

Elles mettent en lumière également l'énorme simplification de la gamme chromatique tempérée sur la gamme pythagoricienne. En effet, au lieu de n'utiliser que deux intervalles (25 et 50 savarts) cette dernière en utilise trois (23, 28 et 51 savarts) ; ces trois intervalles sont d'ailleurs très mal échelonnés, puisque le limma et l'apotome diffèrent de 5 savarts seulement (intervalle qu'on a coutume d'appeler *comma*) ; il en résulte que les deux notes *la* ♯ et *si* ♭ ont une fréquence très voisine, ce qui n'est pas heureux.

Mais, il y a plus : si l'on veut transposer la gamme de Pythagore en prenant comme tonique une des nouvelles notes créées, *ut* ♯ ou *ré* ♯ par exemple, on ne peut pas le faire en se servant des notes déjà existantes. On est donc amené à créer un second système de nouvelles notes, les notes doublement diésées et doublement bémolisées, et ainsi de suite.

On voit la complication qui en résulte, du point de vue pratique.

Toutes ces raisons, plus ou moins consciemment, ont conduit à abandonner finalement — tout au moins en principe — la gamme de Pythagore, malgré ses incontestables qualités mélodiques.

La gamme d'Aristoxène ou de Zarlin. — C'est une gamme basée sur la considération de l'*accord parfait majeur :* on appelle ainsi l'accord le plus consonant de trois notes distinctes.

Si l'on donne à la plus grave le nom d'*ut* les deux suivantes porteront le nom de *sol* et de *mi* et auront pour fréquence par rapport à *ut* : 3/2 et 5/4.

Si partant de la note *sol*, on constitue un nouvel *accord parfait majeur*, on définit les notes *si* et *ré* de fréquences 15/8 et 9/8 par rapport à *ut*.

Si enfin, on prend *ut* comme dernière note d'un troisième *accord parfait majeur* on définit les notes *fa* et *la* de fréquences 4/3 et 5/3.

D'où la suite qui définit la gamme de Zarlin :

1 9/8 5/4 4/3 3/2 5/3 15/8 2

A quelques savarts près, on obtient les notes de la gamme tempérée de mêmes noms.

Exprimés en savarts, les écarts 2 à 2 des notes de la gamme de Zarlin sont égaux à : 51-46-28-51-46-51-28.

D'où trois intervalles : le *ton majeur aristoxénien* (51 savarts), le *ton mineur aristoxénien* (46 savarts), le *demi-ton* (28 savarts).

Que penser de la gamme d'Aristoxène ?

1° *Qualités harmoniques et mélodiques.* — Par définition même, l'intervalle de chaque note avec la note *ut* peut s'exprimer par un rapport simple.

Est-ce à dire que la gamme d'Aristoxène soit parfaite du point de vue harmonique ? Il suffit de chercher l'intervalle de chaque note avec la note *ré*, puis la note *mi*, etc., pour se rendre compte qu'il n'en est rien : on constate en particulier que l'intervalle *ré-la* s'écarte de 6 savarts de la quinte exacte et l'intervalle *ré-fa* de 7 savarts de la tierce mineure exacte.

2° *Transposition.* — La théorie de la transposition avec la gamme d'Aristoxène est extrêmement complexe : elle conduit à introduire un nombre

très important de nouvelles notes, très irrégulièrement échelonnées dans l'octave.

Etant donné l'importance prise par la modulation en composition musicale depuis plusieurs siècles déjà, on conçoit que, malgré certaines de ses qualités harmoniques, la gamme d'Aristoxène n'ait pas donné pleinement satisfaction.

Gammes utilisées en pratique. — Longtemps, la pureté des sons (notamment des accords) fut recherchée avant tout et l'on comprend alors la faveur dont a joui pendant quelques siècles la gamme d'Aristoxène. Puis le développement de l'harmonie, le rôle toujours plus important joué par la modulation dans la composition musicale, la multiplication des instruments de musique et leur utilisation de plus en plus étendue, ont conduit les compositeurs d'une part, les facteurs d'instruments d'autre part, à renoncer à leur intransigeance et à rechercher une gamme moins parfaite à certains points de vue peut-être que les précédentes, mais pratique : ce fut la gamme tempérée, obtenue par simplification des gammes de Pythagore et d'Aristoxène (un seul ton et un seul demi-ton rigoureusement égal à la moitié du ton).

Est-ce à dire que la gamme tempérée soit actuellement la seule à être pratiquement utilisée ?

1° Les instruments dits à *sons fixes* sont, en principe, *accordés* suivant la gamme chromatique tempérée.

Quand dit-on qu'un instrument est à sons fixes ? Quand la hauteur des notes de musique est « fixée » par le facteur d'instruments une fois pour toutes et est, ainsi, imposée à l'exécutant. Accorder un instrument à sons fixes, c'est déterminer la hauteur de chacune des notes.

En fait, l'orgue mis à part, on s'écarte toujours

plus ou moins de la gamme tempérée : c'est en particulier, le cas du piano où l'accord, en raison pu caractère amorti des sons, ne peut se faire qu'à l'oreille, donc en prenant pour critère sa qualité musicale seule.

2° Dans le cas des *instruments à sons mobiles*, on obtient la même variété.

On a déjà vu que le violoniste tendait à se rapprocher, pour l'exécution des mélodies, de la gamme de Pythagore.

Pour les instruments à vent du type cor, dont les notes peuvent être modifiées par simple action des lèvres de l'exécutant, c'est l'oreille et la virtuosité de ce dernier qui déterminent la gamme employée.

3° De façon générale, il est à peu près illusoire de vouloir déterminer la ou les gammes utilisées de nos jours.

D'ailleurs, on peut constater que :

— il est impossible de *jouer juste* pour des raisons pratiques évidentes (usure des cordes de violon, changement de tension des cordes de piano, changement de température de l'air pour les instruments à vent, etc.) ;

— il est impossible d'*entendre juste* (rôle essentiel de l'accoutumance de l'oreille).

On peut même affirmer que, dans un orchestre, chaque exécutant joue suivant sa gamme propre et que l'oreille n'y trouve aucun déplaisir.

D'ailleurs, bien rares sont de nos jours les musiciens qui discutent encore les gammes pratiques actuellement utilisées.

On doit retenir de cette discussion que le mérite énorme de la gamme tempérée a été de cristalliser, sous une forme scientifique et acceptable musicalement, des résultats que des nécessités pratiques

rendaient déjà très utiles il y a quelques siècles, et imposent absolument de nos jours.

Qu'après avoir rempli ce rôle, elle soit plus ou moins suivie dans l'exécution, voilà qui importe d'autant moins que bien peu de personnes sont en fait en état de s'en rendre compte.

Hauteur absolue des notes. — Dès le XVIII^e^ siècle les facteurs d'orgue effectuaient leurs accords à partir d'une note de base prise pour référence, le la *du milieu du clavier ou* la *3.*

Un décret de 1859 fixa, en France, la fréquence du *la* 3 à 435 pér. p. sec.

Ce chiffre était encore récemment adopté universellement par les facteurs d'orgue et de piano. Malheureusement, une Conférence internationale réunie à Londres en 1953 décida d'élever la valeur officielle du *la* 3 et de la fixer à *440 pér. p. sec.*

On ne peut féliciter ceux qui se sont associés à cette regrettable initiative ; en effet, depuis plusieurs siècles, les musiciens ont toujours eu tendance à suraccorder légèrement leurs instruments. Il en est résulté une élévation progressive du *la* 3 qui avait été heureusement freinée par le décret de 1859. Il allait de soi que le *la* 3 officiel étant fixé à 435, le *la* d'orchestre devait être pratiquement légèrement supérieur. Vérification faite on trouva effectivement 440. Un raisonnement erroné fit penser qu'il fallait élever la fréquence officielle du *la* alors que c'est le contraire qui eut été logique. Le résultat de la décision de Londres est que 3 ans plus tard le *la* 3 moyen d'orchestre était passé à 444 pér. p. sec.

Modes et genres musicaux. — Il n'est pas possible de terminer ces considérations sur la gamme sans donner une courte explication du rôle prépondérant, joué de toute évidence en musique par les sept notes : *ut-ré-mi-fa-sol-la-si.*

Ces notes sont les seules à porter un nom particulier — les autres ne paraissant en être que des altérations — elles sont d'ailleurs indiquées de façon différente des autres sur certains instruments à sons fixes très utilisés, notamment les instruments à clavier et la harpe chromatique.

Historiquement, leur existence se justifie facilement ; on n'est d'ailleurs arrivé au chiffre 7 que progressivement, après avoir passé successivement par 4 et 6 (grecs) ou par 5 (chinois).

Pourquoi s'est-on limité à sept notes ? Sans doute parce que ce nombre donnait satisfaction aux musiciens. Les gammes de Pythagore et d'Aristoxène ne font état que de ces sept notes, les notes diésées et bémolisées n'étant vraiment utilisées que comme leurs altérations.

On peut se demander cependant pourquoi, une fois trouvée la gamme *régulière* à douze notes (gamme chromatique tempérée) dans laquelle toutes les notes paraissent jouer le même rôle, on a maintenu le caractère spécial des sept notes fondamentales.

La raison en est simple : si l'on essaie de jouer successivement les douze notes de la gamme tempérée dite *chromatique* (c'est-à-dire dont les notes se succèdent par demi-tons), on obtient une impression de pénible monotonie. C'est pourquoi les Musiciens avaient convenu de ne jamais utiliser dans leurs compositions les douze notes de la gamme chromatique, mais simplement un certain nombre d'entre elles judicieusement choisies (1).

On a défini ainsi une gamme à sept notes caractérisées par une succession d'intervalles d'un ton

(1) Il existe depuis quelque quarante ans une Ecole musicale qui, à l'initiative de Schœnberg, a voulu renoncer à cette restriction évidemment artificielle : c'est l'école atonale ou dodécaphonique, qui a jusqu'à maintenant produit des œuvres dont le moins qu'on puisse dire est qu'elles sont contestables.

et d'un demi-ton et qui a reçu le nom de *gamme diatonique tempérée.*

Bien entendu, d'autres successions de notes sont également susceptibles de donner une impression agréable et différente à l'oreille : c'est la définition des *modes musicaux.*

A chaque mode correspond une suite différente de tons et de demi-tons.

Ces modes d'origine hellénique — comme ultérieurement les modes employés par la musique dite de *plain-chant* très en vogue au Moyen Age — étaient définis par la succession des notes de la gamme de Pythagore ou d'Aristoxène, mais en prenant chaque fois une tonique différente : l'*ut*, puis le *ré*, le *mi*, etc.

On obtient ainsi une série de successions d'intervalles différentes, par exemple : T T *t* T T T *t* (tonique *ut*) ; T *t* T T T *t* T (tonique *ré*) ; *t* T T T *t* T T (tonique *mi*), etc. Les notes diésées et bémolisées n'étaient utilisées que pour les modulations.

Bien entendu — il y a lieu d'insister là-dessus — l'utilisation des mêmes notes dans tous les modes ainsi définis imposait des conditions d'emploi nettement fixées par des règles harmoniques précises pour chacune d'entre elles : c'est ainsi que dans chaque mode, la tonique n'était utilisée que de telle et telle façon, de même la sensible (note précédant la tonique) et toutes les autres qui recevaient chacune un nom particulier (dominante, sous-dominante, sus-dominante, sus-tonique...).

De nos jours, on distingue simplement :

— *le mode majeur*, caractérisé par la succession d'intervalles T T *t* T T T *t*.

(c'est la gamme *ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut* et toutes ses transposées qui sont dans la gamme tempérée au nombre de douze).

— *les modes mineurs*, caractérisés par des successions d'intervalles T et *t* variables et dont la plus utilisée est définie par la suite T *t* T T T T *t*.

(c'est la gamme mineure mélodique *ut*, *ré*, *mi* ♭, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut* et ses douze transposées).

Tous les modes s'obtiennent par combinaison variable des intervalles d'un ton et d'un demi-ton. Leur ensemble constitue le *genre diatonique*, actuellement seul utilisé en musique. Les Grecs ont utilisé d'autres genres caractérisés par l'emploi d'intervalles autres que le ton et le demi-ton. Tels sont le *genre chromatique* et le *genre enharmonique*, où se trouvait entre autres la succession un peu surprenante de nos jours : quart de ton, quart de ton, tierce !

L'étude détaillée des modes et des genres ainsi que du caractère particulier à chacun d'entre eux est du domaine de l'Harmonie musicale.

D) Les sons inaudibles

La gamme des sons audibles couvre toutes les fréquences comprises entre 15 pér. p. sec. et 20.000 pér. p. sec.

Les vibrations de fréquence plus basse constituent les *infra-sons*, qui n'ont pas actuellement d'applications pratiques importantes.

Les vibrations de fréquence supérieures à 20.000 pér. p. sec. constituent le domaine des *ultra-sons*, dont l'importance et le rôle pratique s'étendent chaque jour (1).

(1) Cf. P. Biquard, *Les ultrasons*, collection « Que sais-je ? », n° 21.

E) L'acoustique psychophysiologique

Le développement de l'électro-acoustique et de ses applications (radio, cinéma, enregistrement) a conduit depuis quelques années à étudier la perception du son et notamment de la musique, sous un jour nouveau.

En effet, les appareils techniques ne permettent la conservation et le transport du son à grande distance qu'après introduction de graves déformations — *les distorsions* — que les ingénieurs s'efforcent de réduire, mais qu'ils n'ont pas pu encore faire disparaître complètement.

D'ailleurs les sons qu'offrent aux auditeurs radio et cinéma sont écoutés dans des conditions très diverses et très différentes de ce que donnerait une audition directe : un concert de grand orchestre est souvent entendu dans une pièce normale d'habitation, donc avec une intensité relativement très faible ; inversement la diffusion du même concert par des haut-parleurs de plein air, exige un renforcement du niveau primitif.

On conçoit donc que le technicien soit conduit à « manipuler » la musique ce qui ne manque pas de provoquer une certaine inquiétude du chef d'orchestre et des exécutants.

Ces manipulations, heureusement, ne conduisent pas à des catastrophes, grâce à la *très large tolérance de l'oreille* humaine qui a tendance à s'adapter instinctivement aux conditions d'écoute dans lesquelles elle se trouve : ce sont les limites de cette tolérance d'origine à la fois physiologique et psychologique qui vont être examinées ci-dessous.

Effet de masque. — Il est rare d'écouter un son, sans accompagnement involontaire d'un ou plu-

sieurs bruits extérieurs : on dit que ces bruits produisent *un effet de masque.*

Cet effet se traduit par une diminution apparente du niveau du *son masqué :* on appelle cette diminution, *niveau de masque.*

Il est évident que le niveau de masque augmente avec le *niveau du son masquant ;* mais il varie suivant les fréquences des sons masqué et masquant :

a) L'effet de masque est maximum pour les *fréquences voisines* du son masquant ;

b) L'effet de masque est pratiquement nul tant que le niveau du son masquant n'a pas atteint un certain niveau critique ; puis il augmente quand ce niveau croît, lentement d'abord, puis de plus en plus vite.

C'est ainsi que pour un son de 2.000 pér. p. sec. masqué par un son de 1.200 pér. p. sec., le niveau critique est 30 phones environ. C'est dire que tant que le son masquant est d'un niveau inférieur à 30 phones, le son masqué ne paraît pas affaibli.

Quand le niveau du masquant atteint 50 phones, le niveau du masque est environ 10 ; il atteint 45 pour 80 phones et 75 pour 100 phones ;

c) L'effet de masque est beaucoup plus faible sur les fréquences plus graves que sur les fréquences plus aiguës que celles du son masquant ;

d) L'effet de masque des fréquences graves sur les fréquences aiguës est beaucoup plus fort que l'effet inverse.

On déduit facilement de ces règles générales :

— si le niveau du masquant n'est pas très élevé, l'effet de masque est négligeable, *sauf aux fréquences voisines de la fréquence masquante :* un bruit faible n'est généralement pas gênant ;

— les fréquences masquantes graves sont beaucoup plus gênantes que les fréquences masquantes aiguës (par exemple, les ronflements de moteur) ;

— en général, les fréquences aiguës sont les plus facilement perturbées.

Ces résultats seraient à compléter par l'influence de la *nature* des sons masquants, de leur orientation, de leur relief, etc.

Effet de distorsion d'amplitude. — On appelle *distorsion d'amplitude* l'effet produit sur un son complexe par la suppression, l'affaiblissement ou le renforcement artificiels de certaines fréquences composantes (on modifie leurs amplitudes).

L'effet le plus simple de distorsion d'amplitude s'obtient en coupant toutes les fréquences inférieures à une fréquence donnée (filtre passe-haut) ou toutes les fréquences supérieures à une fréquence donnée (filtre passe-bas).

Les expériences systématiques effectuées depuis plusieurs années ont montré que d'une façon générale, la présence des fréquences aiguës apportait du mordant, augmentait la compréhension, donnait de la richesse au timbre. Les effets de *sifflantes* sont donnés par les fréquences suraiguës (4.000 à 16.000 pér. p. sec.).

Inversement, les fréquences graves créent l'impression subjective d'espace, de volume, de naturel du timbre.

Une curieuse loi (dite des 400.000) exprime que la qualité d'un son est optimum quand le produit des fréquences limites extrêmes est constant (et égal à 400.000) : on n'a donc pas intérêt à améliorer les fréquences aiguës, si l'on ne peut améliorer simultanément les fréquences graves.

Quant aux fréquences moyennes, leur rôle n'a pas encore été parfaitement défini. Il semble ce-

pendant que celles qui sont comprises entre 1.000 et 2.000 pér. p. sec. soient assez désagréables à l'écoute : leur suppression permet de diminuer les effets de zézaiement des speakers ; les excellents violons (Storionius, Stradivarius) n'ont aucun organe présentant des fréquences propres dans ce domaine.

Par contre, la bande de fréquences 2.000-3.000 pér. p. sec. paraît assez favorable : les bons violons ont une importante résonance vers 2.500 pér. p. sec.

Le matériel électro-acoustique moderne *de très haute qualité* peut donner pratiquement sans distorsion, toutes les fréquences comprises entre 30 et 15.000 pér. p. sec.

Effet de distorsion non linéaire. — On appelle *distorsion non linéaire*, la déformation du son due à l'apparition de fréquences parasites qui n'existent pas réellement dans le son initial.

Cette distorsion apparaît non seulement dans l'appareillage, mais aussi dans l'oreille même : on a observé, en effet, depuis très longtemps que, lorsque deux ou plusieurs sons musicaux frappaient le tympan, il se produisait toute une série de sons combinés que les nerfs auditifs ressentent comme de véritables sons objectifs. Ce sont les *sons différentiels :* on les compte par dizaines.

On ne peut évidemment les empêcher. Par contre le perfectionnement de l'appareillage moderne a permis de ramener à une faible valeur la distorsion non linéaire due à la transmission.

Effet de distorsion de phase. — En régime continu, l'oreille, avons-nous vu (1), est insensible aux phases.

Il n'en est pas de même au moment de la *forma-*

(1) Ci-dessus, p. 24.

tion des sons : il existe, comme nous le verrons (1), encadrant le son utile, deux très courtes périodes (le régime *transitoire*) pendant lesquelles les fréquences émises sont très différentes des fréquences qui constituent finalement le son qui sera perçu. Si l'oreille n'est pas capable de discerner les hauteurs correspondantes — trop rapidement évanouies —, elle ressent un effet particulier (*l'attaque* du son) qui dépend à la fois de la valeur de ces fréquences et de la durée de la période transitoire.

Si un déphasage se produit, cette durée peut être artificiellement raccourcie ou (plus probablement) allongée, de sorte que *l'effet de distorsion de phase* devient très sensible à l'oreille : qui n'a pas déploré la « mollesse d'attaque » de certains violonistes, pourtant bien innocents, telle qu'elle apparaît après enregistrement ou transmission radiophonique ? C'est un effet de distorsion de phase.

Superposition des défauts acoustiques. — Si faibles soient-elles dans l'appareillage moderne, les distorsions ne peuvent être totalement supprimées. Un son ne paraît en être exempt, que grâce à la *tolérance* de l'oreille, faculté qui — si l'on n'en abuse point — rend le plus grand service à l'acousticien et au musicien.

(1) Ci-dessous, p. 72 et 87.

Chapitre III

LA PRODUCTION DU SON

A) Les systèmes producteurs de son

Comme nous venons de le voir, les énergies développées par les ondes sonores sont extrêmement faibles : il en est de même des pressions et vitesses sonores. La pression d'une onde audible varie de quelques fractions de millièmes de baryes (1), à quelques baryes, et sa vitesse de quelques microns à quelques centimètres par seconde suivant son niveau et sa fréquence.

On est donc conduit à penser qu'une très faible énergie est nécessaire pour la *production* des sons.

C'est ce qui est effectivement vérifié en pratique.

On a décelé deux groupes de systèmes producteurs de son, qui donnent :

— l'un, les *sons de vibration* ;
— l'autre, les *sons d'écoulement.*

Le principe en est très différent :

Les sons de vibration résultent de la vibration, *autour d'une position d'équilibre*, d'un élément de milieu matériel, solide, liquide ou gazeux ;

Les sons d'écoulement résultent de la formation

(1) Rappelons que 1 barye est sensiblement égal à la pression exercée sur 1 cm² par un poids de 1 mg.

qui n'est possible que dans les gaz seulement (air en général) en raison de leur fluidité, d'éléments singuliers présentant un caractère *tourbillonnaire* et s'écoulant à une cadence régulière.

Généralités sur les sons de vibration. — Du moment que les ondes sonores développent une faible énergie, les variations de vitesse des éléments matériels producteurs de son restent faibles ; c'est ce que l'expérience a vérifié : les corps sonores — cordes de piano, parois de cloches, membranes de haut-parleur — vibrent de façon à peine perceptible à l'œil nu.

Or, quand cette circonstance se produit, les corps en vibration se comportent *élastiquement*, c'est-à-dire ont tendance à reprendre exactement leur position primitive. Si l'on exerce donc une force suffisamment faible sur un corps, le corps se déforme ; si l'on fait cesser brusquement l'action de cette force, le corps revient à sa position d'équilibre, mais il atteint cette position avec une certaine vitesse, la dépasse, et l'on conçoit qu'il se mette à osciller autour de cette position : le mouvement ainsi provoqué a une allure *périodique*.

Mais par suite des divers *frottements* d'une part, et de la transmission du mouvement au milieu ambiant *(rayonnement)* d'autre part, le mouvement s'amortit progressivement : son allure devient, non plus périodique, mais *quasi périodique*.

Au bout d'un certain temps, le corps reprendra sa position d'équilibre, après avoir effectué une série d'*oscillations amorties*.

Si, par un procédé quelconque, on restitue au corps l'énergie qu'il perd du fait des frottements et du rayonnement, l'oscillation peut durer aussi longtemps que lui est appliquée l'énergie d'appoint : on dit que l'*oscillation est entretenue*.

Il existe deux types d'oscillateurs dont les propriétés sont très différentes :

— les *oscillateurs dits à résonance* qui, mis en vibration, donnent *toujours la même* fréquence ;

— les *oscillateurs dits à propagation* susceptibles de prendre, en théorie une infinité, en pratique un très grand nombre, d'*états de vibration distincts.*

Examinons sommairement les propriétés de chacun d'eux.

Oscillateur à résonance amorti à un degré de liberté. — Considérons un poids P suspendu à un ressort en équilibre (fig. 14). Allongeons le ressort et lâchons-le brusquement.

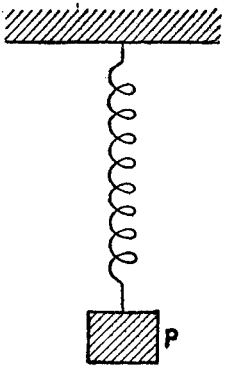

Fig. 14
Oscillateur à résonance

Le poids P décrit autour de sa position d'équilibre primitif toute une série d'*oscillations amorties.*

L'*oscillateur mécanique* ainsi constitué est le plus simple oscillateur connu. On l'appelle *oscillateur à résonance à un degré de liberté.*

C'est le développement mathématique et physique de son étude qui a conduit aux plus extraordinaires et aux plus utiles découvertes de la physique contemporaine.

Quelles en sont les propriétés fondamentales ?

1° La *fréquence* d'oscillation d'un tel système est *constante* pendant le mouvement ; on lui donne le nom de *fréquence propre* ou *fréquence de résonance* du système ; elle ne dépend pas de la plus ou moins grande amplitude des oscillations, mais seu-

lement de la *masse* de P, de l'*élasticité* du ressort et de l'*amortissement ;*

2° Plus l'amortissement est grand, plus la fréquence d'oscillation est faible.

La masse d'air d'un résonnateur vibre à la façon d'un oscillateur à résonance à un degré de liberté.

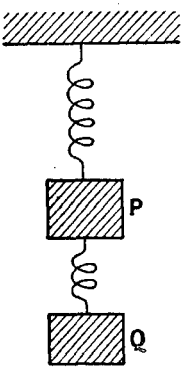

Fig. 15
Oscillateur à résonance à deux degrés de liberté

Oscillateur à résonance amorti à deux degrés de liberté. — Reprenons le système précédent et fixons au poids P un nouveau ressort auquel est suspendu un autre poids Q (fig. 15).

Si l'on tire sur le poids Q, on provoque une oscillation beaucoup moins simple que la précédente : les deux poids P et Q oscillent autour de leur position d'équilibre, mais *chacun d'eux* effectue un *mouvement périodique complexe*, qui peut se décomposer en la somme de *deux* mouvements sinusoïdaux, dont les fréquences sont dites *fréquences propres* du système.

Comme il y a deux poids qui oscillent, le mouvement est dit à *deux degrés de liberté ;* comme le mouvement de chaque poids dépend de l'autre, le système est dit *couplé.*

On conçoit qu'il existe des systèmes oscillants a résonance à trois, quatre, cinq, etc., degrés de liberté : chaque poids effectue alors des oscillations très complexes qui sont la somme de trois, quatre, cinq, etc., mouvements sinusoïdaux : un tel système a donc autant de *fréquences propres* que de degrés de liberté.

Oscillateur à un degré de liberté entretenu par une force sinusoïdale. — Reprenons l'oscillateur à un degré de liberté et supposons qu'on fasse agir sur lui

une force sinusoïdale. Par exemple, faisons tomber sur l'ouverture d'un résonnateur une onde sonore sinusoïdale de fréquence déterminée.

Que va-t-il se passer ?

On constate d'abord que, pendant un très court instant, il se produit une espèce de bafouillage, comme si l'oscillateur ne savait pas quelle allure

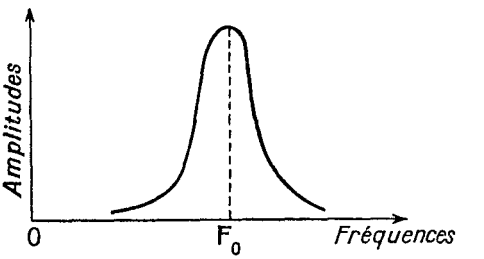

Fig. 16. — Effet de résonance

adopter : cet instant s'appelle *période transitoire* du mouvement.

Après quoi, le mouvement extérieur *impose* à l'oscillateur son rythme, sa fréquence : la *fréquence propre du système n'apparaît pas.* Le mouvement se poursuit régulièrement sans s'amortir : on dit qu'il est *entretenu.*

L'*amplitude* de l'oscillation ainsi produite varie beaucoup, suivant l'écart qui sépare la fréquence d'entretien et la fréquence propre du système non entretenu (fig. 16).

Tant que la fréquence d'entretien reste faible par rapport à la fréquence propre F_0, l'amplitude reste petite : le système semble opposer une inertie importante au mouvement.

Quand la fréquence d'entretien se rapproche

de F_0 l'amplitude croît rapidement, devient considérable pour la fréquence propre appelée aussi, pour cette raison, *fréquence de résonance*, puis décroît vite et devient de nouveau extrêmement faible.

C'est ce qui explique le comportement des résonateurs, tel qu'il a été défini précédemment.

Oscillateur à deux degrés de liberté entretenu par une force sinusoïdale. — Quand l'oscillateur a deux degrés de liberté, on constate les phénomènes suivants :

Il existe d'abord, pendant un court instant, une *période transitoire.*

Puis le mouvement extérieur finit par *imposer* sa fréquence à l'oscillateur : *les fréquences propres du système n'apparaissent pas* et le mouvement a même allure que dans le cas précédent.

L'*amplitude* de l'oscillation ainsi produite dépend essentiellement de la grandeur de la fréquence d'entretien par rapport aux caractéristiques du système oscillant. Deux cas sont à distinguer :

— ou bien, il se produit un phénomène analogue à celui qui se produit dans le cas de l'oscillateur entretenu à un degré de liberté : l'amplitude présente un maximum pour une certaine fréquence, dite *fréquence de résonance* du système et s'atténue quand elle s'en éloigne : c'est ce qui se passe notamment si les amortissements sont forts ;

— ou bien (cas général en Acoustique), il y a *deux* résonances distinctes aux fréquences F_0 et F_1, d'ailleurs différentes des fréquences propres du système, et entre les deux une *antirésonance* à une fréquence F_2 intermédiaire (fig. 17).

Dans le cas des systèmes à trois, quatre, cinq, etc., degrés de liberté, il y a *au plus*, trois, quatre, cinq, etc., fréquences de résonance, parfois moins.

Tous les instruments de musique comportent

des oscillateurs à plusieurs degrés de liberté : leurs fréquences de résonance s'appellent des *formantes* ou *formants*. Et il est évident que — dans

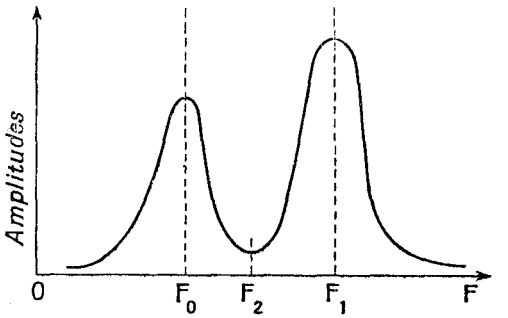

Fig. 17. — Effet de résonance

un violon par exemple — du choix des formantes dépend la qualité du timbre de l'instrument.

La figure 18 donne une idée des formantes de violons de différentes qualités. On remarquera

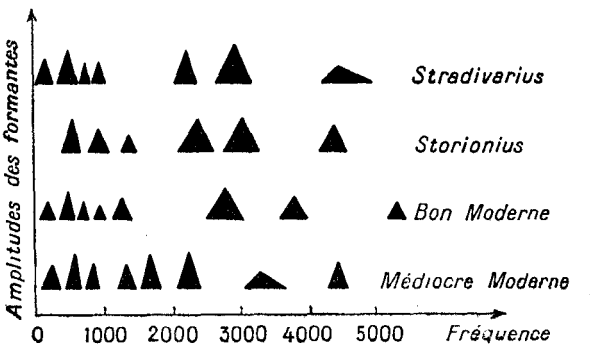

Fig. 18. — Formantes de violons

que les bons violons n'ont pas de formantes dans la bande de fréquence (1.500-2.000) et ont des formantes importantes supérieures à 2.000 pér. p. sec.

Oscillateurs entretenus par une force constante. — Toute force périodique, avons-nous dit, peut être décomposée en une somme de forces sinusoïdales ; toute force périodique peut donc entretenir un régime permanent d'oscillations dans un système oscillant.

Mais lorsque l'énergie appliquée au système n'est plus périodique, il ne devrait plus se produire d'oscillations. Or, l'expérience courante montre que certains systèmes soumis à une *force constante* sont susceptibles d'osciller : c'est le cas notamment des Instruments à archet, dont la force constante est apportée par l'archet, ou des instruments à

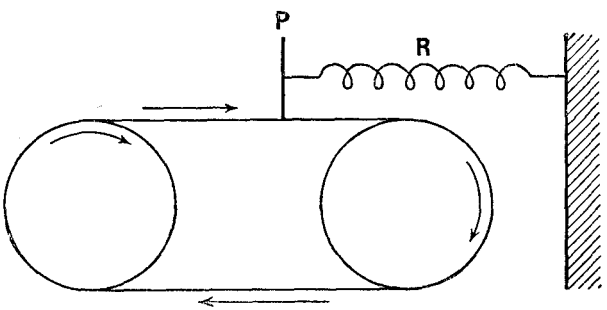

Fig. 19. — Oscillation de relaxation (type 1)

vent excités par un courant d'air régulier émis par la bouche de l'exécutant ou par une soufflerie.

Comment une telle force peut-elle entretenir un mouvement périodique ? C'est ce que nous allons voir à l'aide de deux exemples caractéristiques.

1er exemple : Soit un plateau P fixé à un mur par un ressort R. Supposons le bord de ce plateau de masse *m* en contact avec une courroie qui se déplace à vitesse constante et faible (fig. 19).

On constate que, dans certains cas, sous l'action de la force continue *f* due à l'action de la courroie, le plateau prend un mouvement oscillant.

Comment l'expliquer ?

En admettant que la force transmise effectivement au plateau n'est pas rigoureusement la même pendant toute la durée du mouvement. C'est *par frottement* que le plateau est entraîné : or diverses expériences précises ont montré que la force de frottement qui s'exerce entre deux corps en mouvement changeait suivant la vitesse relative de ces deux corps. Elle est maxima quand les corps

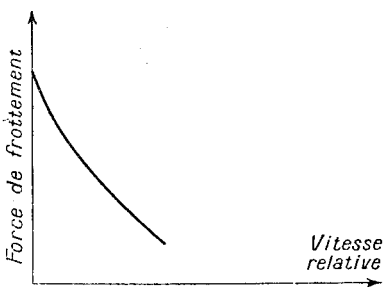

Fig. 20. — Frottement

sont immobiles l'un par rapport à l'autre et décroît rapidement quand la vitesse croît (fig. 20).

On explique facilement, dans ces conditions, le mouvement oscillant du plateau.

Sous l'action du frottement, la courroie entraîne le plateau jusqu'à ce que le ressort s'oppose à ce

mouvement. Alors le plateau est freiné, il prend une certaine vitesse par rapport à la courroie, le frottement diminue, l'action du ressort devient prépondérante ; le plateau est rejeté loin du mur, sa vitesse relative augmente, le frottement décroît encore, l'action de la courroie devient à peu près nulle.

Puis le plateau dépasse sa position d'équilibre et est rappelé vers le mur ; sa vitesse par rapport à celle de la courroie décroît, le frottement devient plus important, le plateau colle à la courroie et le mouvement recommence.

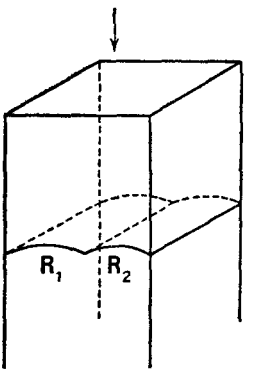

Fig. 21
Oscillation de relaxation (type 2)

On obtient ainsi des oscillations entretenues d'une nature différente de celle des oscillations entretenues par une force sinusoïdale : on leur donne le nom d'*oscillations de relaxation.*

2e *exemple :* Soit un système composé de deux plaques élastiques jointives R_1 et R_2 bouchant un tube rectangulaire (fig. 21).

Faisons agir un courant d'air constant suffisamment intense : dans certains cas, les plaques se mettent à osciller.

Comment expliquer ce mouvement ?

Sous l'action du vent, les plaques sont d'abord entraînées ; à un moment donné, elles sont freinées par leur élasticité et opposent un obstacle au passage du fluide, il se produit alors, derrière les plaques, des *tourbillons de fluide* (analogues aux contre-courants des fleuves qui se forment derrière les piles

de ponts). Ces tourbillons exercent sur les plaques une pression d'autant plus forte que la vitesse *relative* de l'air par rapport aux plaques est plus grande : ils agissent donc comme un véritable frottement.

Le mouvement des plaques s'explique alors rigoureusement de la même façon que celui du plateau dans l'exemple précédent.

On a de nouveau créé des *oscillations de relaxation.*

Propriétés fondamentales des oscillations de relaxation. — Les propriétés des oscillations de relaxation ont été étudiées par M. B. Van der Pol, qui a pu en trouver une expression mathématique simple.

Comme pour les oscillations entretenues par une force périodique, l'amplitude des oscillations *à l'état de régime* est la même, quelle que soit la façon dont commence le mouvement.

La *période transitoire* ou temps mis par le système pour atteindre son état de régime, est longue si le frottement est faible et extrêmement courte si le frottement est fort.

Si le frottement est faible l'oscillation tend vers un régime à peu près *sinusoïdal* de même fréquence que le système seul : la force extérieure a pour rôle unique alors de compenser les pertes dues au rayonnement.

Si le frottement est fort au contraire, l'oscillation tend vers un régime oscillant par *brusques déclenchements périodiques*, comme le montre le graphique ci-contre (fig. 22).

On voit la différence entre de telles oscillations et les vibrations sinusoïdales (fig. 2 et 3). L'analyse des ondes nous permet de décomposer cette oscillation et de constater qu'elle contient de nombreux harmoniques élevés.

Ces propriétés sont facilement mises en évidence par l'étude du premier exemple ci-dessus :

Si le frottement « plateau-courroie » est faible, le plateau ne sera entraîné que peu à peu (période transitoire longue) et l'on conçoit que ses carac-

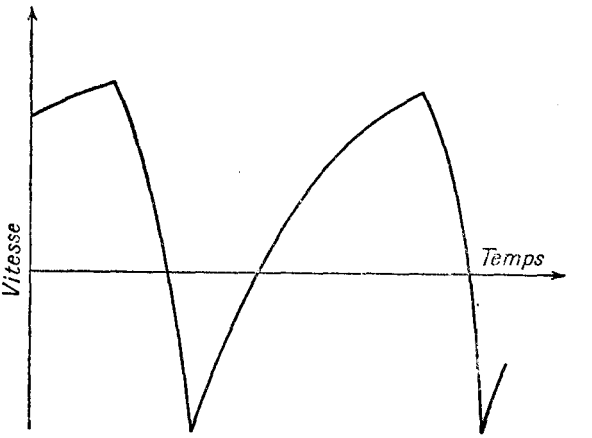

Fig. 22. — Oscillations à brusques déclenchements

téristiques finissent par imposer au mouvement une fréquence voisine de sa fréquence propre.

Si le frottement « plateau-courroie » est fort, dès la première oscillation, l'entraînement sera total (période transitoire courte), et la fréquence du mouvement sera définie beaucoup plus par des conditions extérieures (vitesse de la courroie par exemple) que par la fréquence propre du plateau.

Oscillateurs à propagation. — On appelle *oscillateurs à propagation* des oscillateurs dont les conditions de fonctionnement dépendent d'un phénomène de propagation. Les plus connus sont :

les *cordes vibrantes* (violon), les *tuyaux sonores* (saxophone) et les *membranes vibrantes* (tambour) (1).

Si en un point d'un de ces oscillateurs, on provoque une perturbation, celle-ci se propage le long du milieu élastique qu'il constitue, se réfléchit sur les extrémités, repasse au point d'émission, va se réfléchir sur une autre extrémité de l'oscillateur et ainsi de suite.

Chaque point du système reçoit donc périodiquement la perturbation (qui en fait s'amortit peu à peu). Son mouvement est donc *périodique* ou plutôt *périodique-amorti.*

L'expérience courante montre qu'un même oscillateur est susceptible de donner au choix *toute une série* de mouvements périodiques qui se sélectionnent dans des conditions souvent encore mal définies.

Ces différents états de vibration prennent le nom de *partiels.*

Corde vibrante. — Soit une corde tendue fixée à ses deux extrémités. Ecartons-la de sa position d'équilibre : elle se met à vibrer et présente l'aspect d'un fuseau — en raison de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine — : on obtient le partiel 1 (fig. 23).

Le physicien Taylor a calculé que si T est la tension en kg. de la corde, ρ sa densité linéaire — poids de 1 m. de corde — et l sa longueur, la fréquence fondamentale du partiel 1 est donnée par la formule :

$$n_1 = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

(1) En font partie aussi les *parois vibrantes* (cloches), les *verges vibrantes* (anches d'harmonium) et de façon générale tout milieu matériel vibrant pourvu qu'il ne soit pas petit dans toutes ses dimensions.

Prenons délicatement entre le pouce et l'index le milieu de la corde de façon à ne pas la serrer, mais à l'immobiliser. Le fuseau primitif se scinde en deux demi-fuseaux : la fréquence fondamentale double : $n_2 = 2\ n_1$.

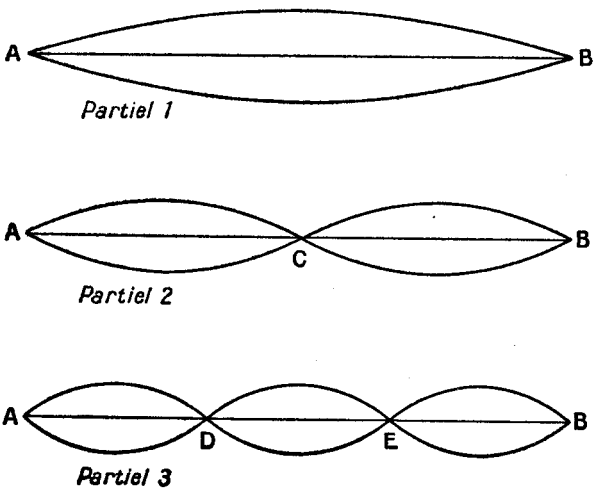

Fig. 23. — Corde vibrante

La corde vibre suivant le partiel 2.

En immobilisant de même un point situé au 1/3 de la corde, on obtient le partiel 3 tel que $n_3 = 3\ n_1$, etc. (fig. 23).

Tuyau sonore cylindrique. — 1° Soit un pipeau de berger ouvert à ses deux extrémités.

Soufflons à l'intérieur d'abord très doucement et forçons le souffle : à un moment donné, on entendra un son.

Ce sera le partiel n° 1 dont la fréquence fondamentale est donnée par la formule : $n_1 = \frac{33.000}{2l}$ (33.000 étant la vitesse du son dans l'air, exprimée en cm. ; l étant la longueur du tuyau).

Forçons le vent progressivement : il arrivera un instant où la hauteur du son changera. Le son passera à l'*octave*. Fréquence $n_2 = 2\ n_1$.

Ce sera le partiel 2 : on dit que le tuyau *octavie*.

En forçant encore le vent, on peut obtenir toute une série de partiels dont les fréquences fondamentales sont les multiples de n_1.

2° Reprenons le même pipeau, et refaisons les mêmes expériences, mais cette fois-ci, en maintenant bouchée l'extrémité du tuyau.

On constate que le partiel n° 1 de l'oscillateur ainsi constitué est à l'*octave grave* du partiel n° 1 du tuyau ouvert.

Cette fois-ci on a : $n'_1 = \frac{33.000}{4l}$.

Par contre, la fréquence fondamentale du partiel n° 2 est le *triple* de celle du partiel 1 ; le son formé est à la *quinte de l'octave* du partiel 1 : $n'_2 = 3\ n'_1$.

On dit que le tuyau *quintoye*.

En forçant le vent, on obtient toute une série de partiels dont les fréquences fondamentales sont tous les *multiples impairs* de n'_1.

Tuyaux sonores coniques et cylindro-coniques. — On utilise souvent en musique des tuyaux sonores coniques (hautbois, saxophones, etc.) et cylindro-coniques (cor).

L'étude de leurs partiels est plus complexe.

De façon générale, on peut dire que les partiels des tuyaux coniques *ouverts ou fermés* qui consti-

tuent des instruments de musique, ont des fréquences fondamentales qui forment une suite harmonique 1, 2, 3, 4...

Les tuyaux coniques *octavient.*

Il en est de même approximativement des cylindro-coniques.

Membranes vibrantes. — Les membranes — de tambour — sont des lames minces d'épaisseur constante, parfaitement flexibles et tendues de façon uniforme : elles sont constituées en pratique par des *peaux tendues* de mouton ou de chèvre.

Les partiels des membranes sont beaucoup plus nombreux que ceux des cordes et leurs fréquences vont en se resserrant de plus en plus. On a calculé qu'une membrane vibrante circulaire dont le partiel 1 avait pour fréquence 1.000 pér. p. sec., présentait la série de partiels suivante :

1.000, 1.595, 2.135, 2.295, 2.655, 2.920, 3.155, etc.

Entre les fréquences 4.000 et 8.000 on aurait trouvé plus de 30 partiels, soit 6 par ton.

Généralités sur les sons d'écoulement. — On en connaît trois groupes :

— les sons de sillage ;
— les sons de jet ;
— les sons de biseau.

Les *sons de sillage* sont produits :

— soit quand un obstacle se déplace dans un fluide immobile à grande vitesse (sifflement d'une cravache, d'un projectile) ;
— soit quand le fluide s'écoule en masse au tour d'un obstacle immobile (sons *éoliens*, bruit du vent dans les fils).

Les *sons de jet* sont produits par la détente à travers une petite ouverture d'un fluide comprimé

(sifflement du gaz non allumé) ; le jet de gaz ne se mélange pas immédiatement à l'air mais forme une colonne oscillante séparée du fluide ambiant par une zone tourbillonnaire qui s'écoule à la vitesse du fluide (fig. 24).

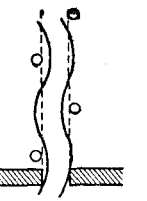

Fig. 24
Son de jet

Les sons de biseau sont produits par l'écoulement d'un jet sur un obstacle en forme de coin dont l'arête est parallèle au bord de la fente (sifflets, flûtes) (fig. 25).

Le mécanisme de formation des sons d'écoulement a un caractère *relaxatif.*

Les sons d'écoulement sont *accommodables* ; c'est dire que si sur le trajet ils rencontrent un élément ayant une fréquence propre bien déterminée, leur fréquence se *synchronise* (dans certaines limites) avec cette fréquence propre.

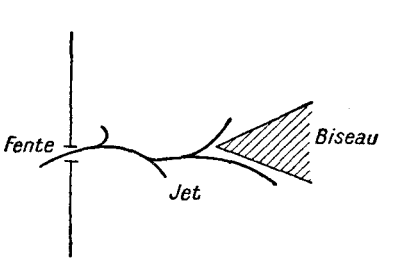

Fig. 25. — Son de biseau

Oscillateurs complexes. — Les appareils producteurs de son (voix, instruments de musique, haut-parleurs) sont des *systèmes oscillants complexes*, ils peuvent comprendre en effet des oscillateurs à résonance, des oscillateurs à relaxation, des oscillateurs à propagation et même être susceptibles de donner des sons d'écoulement.

1° Parmi les oscillateurs à propagation, certains servent à *fixer la hauteur du son émis :* tel est le cas des cordes vibrantes, pour les instruments à corde, pour la voix (cordes vocales), des tuyaux sonores

pour les instruments à vent, et même de la membrane vibrante pour certains instruments à membranes réglables, tels que les *timbales d'orchestre.*

Dans toute une série de ces instruments (instruments à archet, instruments à vent), des phénomènes de relaxation conditionnent la mise en vibration des cordes ou tuyaux.

Il faut d'ailleurs remarquer que les instruments dont la hauteur est fixée par un oscillateur à propagation contiennent en général d'autres oscillateurs du même type (table et fond de violon, table d'harmonie du piano, parois des cuivres) qui jouent un rôle important dans le rayonnement du son dans l'air et dans la formation du timbre ;

2° Les appareils producteurs de son comportent également des oscillateurs à résonance à n degrés de liberté ; les fréquences de résonance de ces systèmes conditionnent en partie la sonorité de l'appareil ;

3° Ajoutons-y, pour achever la description, le système provoquant la vibration ou l'écoulement : main, crochet, marteau, plectre, courant d'air, etc.

B) La voix

L'oreille humaine est habituée à distinguer d'une part, la *voix* et la *musique* qui constituent la base des sons *agréables* à écouter ; d'autre part le *bruit* que, souvent, on cherche à éviter.

L'étude de la voix est donc un des problèmes les plus intéressants qui soit posé à l'acousticien : son ampleur dépasse le cadre de cet ouvrage ; aussi n'y donnerons-nous que quelques indications en rapport avec les problèmes physiques que pose l'étude de la musique (1).

(1) Cf. Edouard GARDE, *La voix*, collection « Que sais-je ? », n° 627.

Structure de la parole. — Chaque son issu de la bouche est composé de deux *périodes transitoires* (périodes d'établissement et d'extinction du son) et d'une *période de stabilité*. La période de stabilité s'appelle *voyelle ;* les périodes transitoires quand elles sont perceptibles à l'oreille, ce qui n'est pas toujours le cas, s'appellent *consonnes.*

Les *voyelles* sont produites par la *vibration des cordes vocales :* cette vibration ouvre ou ferme alternativement la fente placée à l'extrémité de la trachée dans le larynx ce qui produit une série d'ondes sonores dans la gorge.

Les résonnateurs que constituent les cavités vocales du nez, de la gorge et de la bouche favorisent certaines fréquences variables avec la voyelle émise et lui donnent sa courbe caractéristique de fréquence.

Les courbes ci-dessous (fig. 26) nous montrent que les voyelles ont toutes au moins *deux régions* de fréquence de résonance ; que les sons féminins se dis-

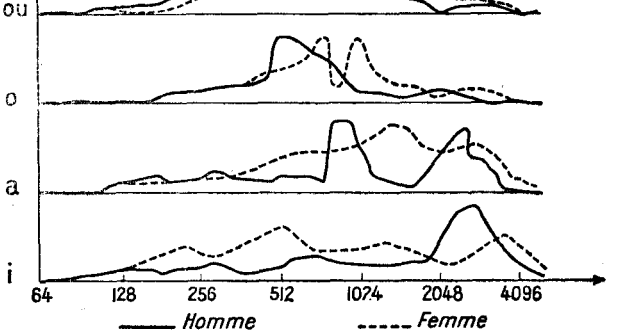

Fig. 26. — Energie des voyelles en fonction de la fréquence (d'après Crandall)

tinguent des sons masculins à la fois par la hauteur et par le timbre, que les fréquences utilisées par les voyelles ne dépassent guère 5.000 pér. p. sec.

Les *consonnes* se divisent en *consonnes vocales* (*g*, *r* gutturaux) produites par les cordes vocales, et dont la nature rappelle les voyelles, sauf en ce qui concerne leurs fréquences qui sont plus élevées et leurs niveaux qui sont plus bas ; et en *consonnes non vocales (p, k, f, s...)* produites exclusivement par le frottement de l'air sur les lèvres, la langue, les dents, le palais. Ces consonnes présentent un nombre de fréquences de résonance variable (3 pour les consonnes nasales), ces fréquences sont particulièrement élevées, et les niveaux faibles.

Energie de la parole. — L'énergie produite par la parole est extrêmement faible : on a calculé qu'il faudrait en moyenne quinze millions de speakers parlant simultanément pour produire une puissance acoustique de 1 cheval-vapeur. Pour un même speaker, l'énergie de parole peut varier dans le rapport de 1 à 10.000 ; d'un speaker à l'autre l'énergie de parole varie de 1 à 500.

Cette variation est due aux conditions dans lesquelles parle le speaker.

Des essais, dus à Crandall ont montré que c'étaient les fréquences basses qui contenaient la plus grande partie de l'énergie de la parole.

La courbe ci-contre (fig. 27) passe par un maximum pour les fréquences de 100 à 125 pér. p. sec. si le speaker est masculin ; de 200 à 250 pér. p. sec. si le speaker est féminin.

Les voix de femmes sont donc d'une octave plus élevées que les voix d'hommes.

Intelligibilité de la parole. — On appelle *intelligibilité* de la parole dans des conditions d'écoute données, le *pourcentage de parole* susceptible d'être

compris. L'intelligibilité dépend de nombreux facteurs (énergie de parole, vitesse, qualité vocale du speaker, résonance de la pièce dans laquelle on parle, bruit ambiant moyen).

Des expériences systématiques ont montré que

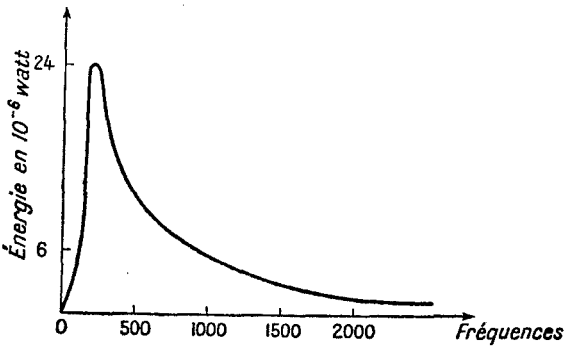

Fig. 27. — Energie de parole (d'après Crandall)

contrairement à l'énergie, l'intelligibilité de la parole se trouvait dans les fréquences aiguës.

Si donc avec un filtre passe-bas, on coupe toutes les fréquences aiguës de la parole, on obtient une voix presque aussi forte, mais brouillée et incompréhensible.

Si au contraire, on coupe avec un filtre passe-haut les fréquences basses, on n'a plus qu'un filet de voix mais parfaitement clair.

On conçoit l'importance de ces remarques pour les ingénieurs du téléphone. Nous n'insisterons pas.

C) Les instruments de musique

C'est par centaines que l'on peut compter les instruments de musique qui appartiennent à notre civilisation ; si on y ajoute ceux qui ont existé

autrefois ou qui existent encore dans l'Inde ou l'Extrême-Orient où leur nombre est considérable, on dépasse de beaucoup le millier.

Or, si nombreux et si variés soient-ils, ils possèdent tous, ou par groupes, des propriétés communes et cachent sous la multiplicité de leurs formes et de leurs aspects une véritable unité de structure.

Le premier problème qui se pose donc à l'Acousticien est de classer les instruments de musique.

Classification des instruments de musique. — Effectuée sur plus de quatre cents instruments d'âge et de lieu d'emploi aussi variés que possible, la classification suivante englobe à quelques unités près, tous les types connus :

1er groupe. — Les instruments à cordes

La hauteur de la note émise est réglée par la vibration d'une *corde vibrante.*

Trois sous-groupes :

1° *Les instruments à cordes pincées*, à *vibrations amorties*, le son étant provoqué par écartement de sa position d'équilibre de la corde qui, lâchée sans vitesse initiale, peut ensuite osciller librement.

On distingue :

a) Les instruments ayant autant de cordes qu'il est possible d'émettre de notes. Ces instruments peuvent être :

— *à clavier.* Type : *le clavecin.*

— *sans clavier.* Type : *la harpe chromatique.*

b) Les instruments ayant moins de cordes qu'il est possible de donner de notes. Type : *la mandoline.*

2° *Les instruments à cordes frappées*, à *vibrations amorties*, le son étant provoqué par le choc d'un marteau qui donne une vitesse initiale à la corde, celle-ci pouvant ensuite osciller librement.

Tous ces instruments présentent autant de cordes qu'il est possible d'émettre de notes : ils peuvent être :

— *à clavier.* Type : *le piano à queue.*

— *sans clavier.* Type : *le cembalo.*

3° *Les instruments à cordes frottées,* assez nombreux, à *vibrations entretenues* par le frottement d'*un archet* sur une corde.

Tous ces instruments présentent moins de cordes qu'il n'est possible d'émettre de notes ; ils peuvent être :

— *à archet droit.* Type : *le violon.*

— *à archet tournant.* Type : *la vielle.*

2e groupe. — Les instruments à vent

La hauteur de la note émise est réglée par la vibration d'un *tuyau sonore.* Ils sont tous à *vibrations entretenues* par un courant d'air.

Trois sous-groupes :

1° *Les instruments à embouchure de flûte.* — Le son est créé par le frottement de l'air issu de la bouche sur un biseau. On distingue :

a) Les instruments ayant autant de tuyaux qu'il est possible d'émettre de notes.

Type : *la flûte de Pan.*

b) Les instruments à un seul tuyau, le biseau pouvant alors être :

— *soit le bord d'un trou percé dans le tuyau.* Type : *la flûte traversière.*

— *soit un morceau de bois rajouté dans le tuyau.* Type : *le flageolet.*

2° *Les instruments à anches.* — Le son est créé par la vibration sous l'action d'un courant d'air, d'une petite languette simple ou double, en

métal ou en roseau, appelée *anche*. On distingue :

a) Les instruments ayant autant de tuyaux qu'il est possible d'émettre de notes.

Type : *l'orgue* (qui possède également des tuyaux du type à embouchure de flûte).

b) Les instruments à un seul tuyau. Ces instruments peuvent être :

— *à perce cylindrique et à anche simple.* Type : *la clarinette.*

— *à perce conique et à anche double.* Type : *le hautbois* (appareil en laiton), *les saxophones* (appareils en cuivre).

c) Les instruments à deux ou trois tuyaux et à réserve d'air. Type : *la cornemuse.*

3° *Les instruments à embouchure de cor.* — Le son est créé par la vibration des lèvres du musicien, qui jouent le rôle d'*anches membraneuses.* Tous ces instruments sont à un seul tuyau. On distingue :

— *les instruments sans réglage de hauteur.* Type : *le cor d'harmonie.*

— *les instruments à trous.* Type : *le serpent.*

— *les instruments à coulisse.* Type : *le trombone à coulisse.*

— *les instruments à cylindres et pistons.* Type : *le cornet à piston.*

3e groupe. — Les instruments à percussion

Ce sont des instruments à *vibrations amorties*, provoquées par le choc d'un marteau sur une membrane tendue ou une plaque vibrante qu'on laisse ensuite osciller librement.

Deux sous-groupes :

1° *Les instruments à membranes tendues.* Celle-ci peut être :

— *soit réglable.* Type : *les timbales d'orchestre.*

— *soit non réglable.* Type : *la grosse caisse.*

2° *Les instruments à plaques vibrantes.* On distingue :

— *les instruments à percussion simple.* Type : *les cloches.*

— *les instruments à percussion double.* Type : *les cymbales.*

4e groupe. — Les instruments à verge vibrante

Ce sont des instruments à *vibrations amorties ou entretenues* provoquées par les oscillations d'une verge écartée de sa position d'équilibre par un des procédés suivants :

1° *Choc d'un marteau.* Type : *le xylophone.*

2° *Action d'un courant d'air :*

— *soit pulsé par une machine.* Type : *l'harmonium.*

— *soit pulsé directement par l'exécutant.* Type : *l'accordéon.*

3° *Action mécanique.* Type : *la boîte à musique.*

4° *Action directe de l'exécutant.* Type : *la scie musicale.*

Les instruments de musique qui n'appartiennent pas à l'une de ces catégories peuvent se compter sur les doigts de la main et sont d'un emploi très rare : citons, parmi les plus connus, l'*ocarina*, la *harpe éolienne* et tous les jouets sonores, tels que le *bigophone.*

Le classement des instruments de musique tel qu'il vient d'être donné présente un assez grand intérêt parce que tous les autres classements physiques peuvent s'en déduire presque instantanément. C'est ainsi qu'on peut distinguer, les instruments à clavier, les instruments à percussion, les instruments à archet, les instruments à trous, etc., suivant la façon dont sont obtenues les différentes hauteurs des notes. Un autre classement distin-

gue les instruments à sons mobiles et à sons fixes.

Plus intéressant est celui qui sépare les instruments à vibrations entretenues (avec ses quatre groupes : instruments à archet, instruments à embouchure de flûte, instruments à anches, instruments à embouchure de cor) et les instruments à vibrations amorties.

Ce classement a d'ailleurs un caractère musical : on constate, en effet, que les orchestres sont constitués en grande majorité par des instruments à vibrations entretenues ; en outre, les chefs d'orchestre placent toujours (1) le plus près possible des auditeurs les instruments à archet, puis les instruments à embouchure de flûte et à anches (les bois), enfin les instruments à embouchure de cor (les cuivres). Les instruments à percussion constituent la *batterie*, éloignée au maximum du chef d'orchestre et des auditeurs.

Les instruments à cordes. — La hauteur de la note émise est réglée par la vibration d'une corde vibrante.

Les cordes vibrantes employées réellement dans les instruments de musique ont des propriétés légèrement différentes de celles des cordes théoriques.

En effet, on appelle *corde*, au sens théorique, un *fil* — corps dont la longueur est très grande par rapport à ses autres dimensions — parfaitement flexible, c'est-à-dire sans rigidité transversale.

En pratique, les cordes n'existent pas ; mais les fils soumis à une forte tension — plusieurs dizaines de kg. par mm^2 — s'en rapprochent très sensiblement : telles sont les *cordes à piano* — en acier — *les cordes à boyau*, les cordes en fibres végétales ou en fils de soie tendus.

Néanmoins les fils réels ont une certaine raideur

(1) Tout au moins, dans le cas de la musique symphonique.

dont l'effet est d'autant plus marqué que le fil est plus court, la section plus grande et la corde moins tendue : le son obtenu est toujours plus haut que celui calculé par la formule de Taylor. Considérons par exemple un fil de cuivre de 10 cm. de long soumis à une tension de l'ordre de 20 kg./mm^2 ; si son diamètre est de l'ordre de 1/10 mm. la différence de la hauteur avec le son théorique est négligeable, s'il est 2/10 mm. elle est de quelques savarts, pour atteindre 1/2 ton (25 savarts) si le diamètre est 9/10 mm.

Malgré son approximation, la formule de Taylor permet d'expliquer facilement certaines règles pratiques employées par les facteurs d'instruments à corde ou les exécutants pour obtenir les notes employées ; rappelons-la :

$$n = K \times \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

K étant le numéro du partiel utilisé, l étant la longueur de la corde, T sa tension, ρ la masse de l'unité de longueur (densité linéaire).

a) Remarquons d'abord que, sauf cas particulier, seul est utilisé le *partiel n° 1* (K = 1). Pour émettre un autre partiel, il est nécessaire de fixer un point *bien choisi* de la corde, ce qui, on le sait, n'est pas réalisé couramment.

C'est cependant le cas de la *trompette marine*, instrument à une seule corde de 1m. 50 de longueur environ, qu'on tient comme un violoncelle. On en joue de la façon suivante : on pose sans appuyer, le pouce de la main gauche sur un point judicieusement choisi de la corde et l'on frotte avec l'archet entre le pouce et la partie supérieure de la corde. Le pouce n'appuyant pas, la corde vibre toujours en son entier.

On n'obtient de sons musicaux que si le pouce

divise la corde en deux parties qui sont entre elles dans un rapport rationnel. Les sons forment alors à peu près la série harmonique normale (gamme de Zarlin). Seuls sont exacts, les sons donnés par les six premiers harmoniques et les harmoniques 8, 9, 10, 12, 15, 16. Les autres sont faux et il n'est pas possible de les corriger. Nous n'insisterons pas.

b) La loi dite des longueurs *(n* inversement proportionnel à *l)* permet d'obtenir de façon continue toutes les fréquences comprises entre deux fréquences limites extrêmes.

C'est ce procédé qui est utilisé très généralement pour obtenir les différentes notes données par l'instrument :

— soit en prévoyant autant de cordes que de notes (ce qui n'est pas réalisé dans le cas des instruments à archets) ;

— soit en modifiant la longueur de la corde pour l'adapter à la note jouée. Deux moyens sont alors employés :

Le premier consiste à diviser le manche par des *touches*, petites lamelles de bois fixées sous les cordes et qui servent lorsque le doigt appuie sur elles, à limiter leur longueur ; l'exécutant n'est alors pas maître de la hauteur exacte qu'il donne à sa note (cas des instruments à archet anciens, tels que basse de viole, viole d'amour et de la plupart des instruments à cordes pincées).

Le violoniste au contraire est absolument maître de fixer lui-même la longueur de la corde sur laquelle il joue, le manche du violon étant une *surface lisse sans touches ;* comme pour assurer la précision du savart sur la hauteur d'un son, il faut que le point d'appui du doigt soit déterminé à moins de 1 millimètre près, on conçoit qu'il soit difficile de jouer juste.

c) La loi des *tensions* (*n* proportionnel à $\sqrt{T}$) permet d'*accorder* l'instrument : on sait que dans les instruments à archet, des *chevilles* permettent facilement ce réglage, avant chaque exécution.

d) La loi des *densités* (*n* inversement proportionnel à $\sqrt{\rho}$) sert dans la construction des cordes destinées à donner des notes *graves*. En effet, pour obtenir de telles notes, on devrait prendre des cordes lourdes et les tendre peu : l'expérience montre que les sons deviennent alors ternes et sourds.

On évite ce défaut, on emploie des cordes filées, constituées par une *âme* — en boyau généralement — fortement tendue, autour de laquelle est enroulé en spirales jointives un *trait*, fil de cuivre. La corde la plus longue du violon est filée, ainsi que les deux cordes les plus longues de l'alto et du violoncelle.

Les instruments à archet (1). — Examinons maintenant comment les cordes sont mises en vibration par le musicien.

Dans le cas des instruments à cordes frottées — les plus remarquables par leur sonorité — celui-ci emploie un *archet*.

L'archet classique est constitué par une mèche de *crins* (queue de cheval) tendue sur un arc de bois ; l'ensemble est imprégné de *colophane*.

L'archet du violon et de l'alto a 73 cm. de long, l'archet du violoncelle 67 cm. Les crins qui le constituent sont assez résistants et doués d'une grande élasticité qui justifie leur emploi.

La colophane est une résine traitée par fusion et filtrage ; la bonne colophane est transparente et jaune citron ; elle blanchit les crins de l'archet et donne une poussière blanche ; elle ne doit pas coller aux doigts.

(1) Cf. Marc PINCHERLE, *Les Instruments du quatuor*, collection « Que sais-je ? », n° 272.

L'archet est déplacé sur la corde, de façon que les crins restent normaux à cette corde, à une vitesse qui varie approximativement de 2 à 150 cm./sec., suivant l'intensité du son à produire, la pression exercée étant sensiblement constante et de l'ordre de 100 gr.

Le mécanisme de l'archet est éclairé par l'expérience de Charron sur les corps frottants ; soit deux disques se touchant par leur bord, l'un entraîné par un moteur faisant office d'archet tournant, l'autre ayant pour axe un fil métallique servant de dynamomètre de torsion (fig. 28).

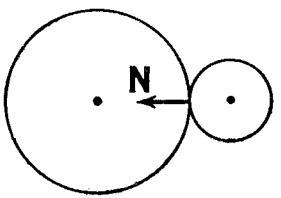

Fig. 28
Disques de Charron

Si N est la pression normale exercée par le disque moteur sur le disque résistant, la force de frottement qui entraîne le disque résistant est, d'après Charron, donnée par la formule : $F = \frac{fN}{1 + bv}$

f étant le coefficient de frottement au repos ;
v la vitesse relative ;
b un coefficient variant avec le *lubrifiant* placé entre les surfaces des disques.

Si ce lubrifiant est du pétrole ou de l'*huile fine*, b est voisin de zéro et F est sensiblement indépendant de la vitesse.

Si c'est de la colophane, $b = 1$ s./m. : alors F décroît très vite et tend vers zéro quand la vitesse augmente suffisamment. La colophane assure donc l'adhérence aux faibles vitesses et agit comme lubrifiant aux grandes vitesses.

Comment agit l'archet sur la corde ?

Au début du mouvement, la vitesse relative étant nulle, le frottement est fort et la corde, entraînée à la vitesse de l'archet, s'éloigne de sa position d'équilibre. Il arrive un moment où les forces élastiques de rappel dépassent les forces d'adhérence au repos fN ; la corde décroche, elle prend une certaine vitesse relative par rapport à l'archet, la force de frottement diminue, l'action de l'archet décroît brusquement, la corde se met à osciller de façon à peu près libre ; elle dépasse sa position d'équilibre, va occuper une position extrême, puis rappelée par les forces élastiques, se déplace dans le sens de l'archet. Les phénomènes inverses se produisent alors : la vitesse relative corde-archet décroît, la force de frottement augmente, l'archet adhère à la corde et l'entraîne et le mouvement recommence périodiquement.

L'allure du mouvement d'un point de la corde est donné par la courbe de la figure 29.

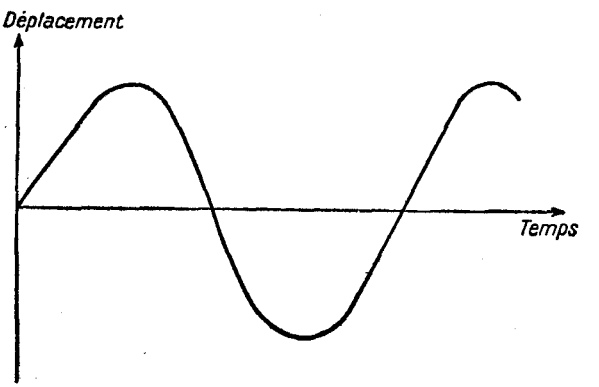

Fig. 29. — Mouvement de la corde d'un violon

Pendant l'intervalle de temps où l'archet entraîne la corde, on a un mouvement sensiblement uniforme ; le reste du temps on a un mouvement sensiblement sinusoïdal.

Un instrument à archet : le violon. — Associé à l'alto, au violoncelle, à la contrebasse, le violon constitue l'élément de base de l'orchestre symphonique.

A quelques détails près, ces quatre instruments sont constitués sensiblement de la même façon. Leurs parties essentielles sont (fig. 30) :

— une caisse, dont la partie supérieure percée de deux ouvertures en forme d'*f*, les *ouïes*, s'appelle la *table*, et la partie inférieure, le *fond ;*

— une *barre*, planchette de sapin, placée latéralement et collée sur la partie intérieure de la table ;

— une *âme*, petite tige de sapin, coincée debout entre la table et le fond, latéralement et du côté opposé à la barre ;

— un *manche* en érable, collé à la caisse et comportant un *sommier* dans lequel tournent les chevilles ;

— quatre *cordes*, fixées d'un côté aux chevilles, s'appuyant sur un petit taquet d'ébène, le *sillet*, puis sur un *chevalet* en érable qui adhère à la table du violon, enfin attachées à leur extrémité sur un *cordier* ;

— la *touche*, planchette d'ébène collée au manche : c'est sur la touche que l'extrémité du doigt appuie la corde pour modifier la longueur de la partie vibrante.

Malgré ses apparences extérieures symétriques, un violon, du fait de la présence de la barre à gauche, de l'âme à droite, est en fait dissymétrique. Cette dissymétrie s'explique par le désir des luthiers d'obtenir les sons les plus intenses possibles, ce qui les a conduits à distinguer les sons *tirés* obtenus quand la main tenant l'archet s'écarte des cordes, et les sons *poussés* obtenus dans le cas

contraire. L'expérience a montré que la présence d'une barre à gauche favorisait l'émission des sons tirés — un peu au détriment, il faut le dire, des sons poussés —. Appliquées au violoncelle dont la

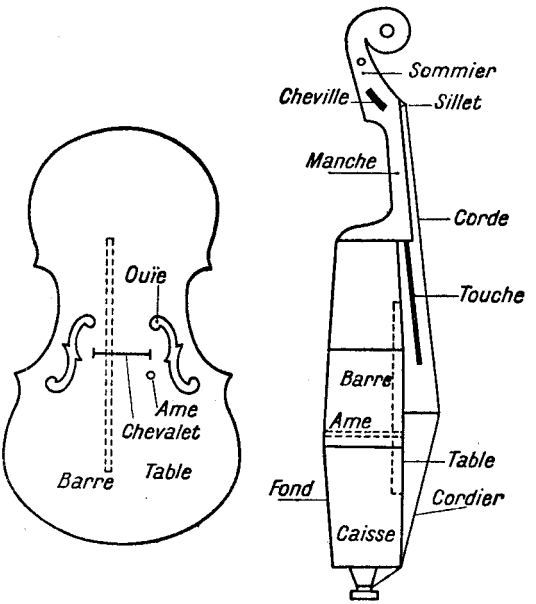

Fig. 30. — Instrument à archet

position pendant l'exécution, est l'inverse de celle du violon, ces considérations conduisent à penser que ce sont les sons poussés les plus intenses ; ce que vérifie la pratique.

Quant au rôle de l'âme, il semble double :

— d'une part, transmettre au fond les vibrations reçues par la table ;

— d'autre part, immobiliser un point déterminé

de la table, ce qui, d'après des expériences concluantes de Savart, renforce sensiblement le son.

Le chevalet parfaitement symétrique de forme et qui reçoit la pression normale des cordes, environ 12 kg pour le violon, 108 kg pour la contrebasse, transmet les vibrations des cordes à la table. Du fait de la dissymétrie de celle-ci l'action des deux pieds est nettement différente, le pied droit voisin de l'âme est à peu près immobile.

A été examiné également le rôle du vernis dans le timbre, mais de façon si peu systématique qu'on n'en peut rien déduire scientifiquement.

Quant à la forme du violon, elle paraît ne jouer qu'un rôle restreint dans la sonorité : Savart a fait un bon violon de forme trapézoïdale et présentant des ouïes rectilignes.

Rappelons enfin que les sons à *vide* du violon sont : mi_4 la_3 $ré_3$ sol_2 ; ceux de l'alto : la_3 $ré_3$ sol_2 ut_2 ; ceux du violoncelle : la_2 $ré_2$ sol_1 ut_1 et enfin ceux de la contrebasse : sol_1 $ré_1$ la_0 mi_0.

L'alto diffère essentiellement du violon par la grosseur et la tension des cordes.

Le violoncelle repose sur une *pique* ; le doigté nécessitant plusieurs démanchements est plus compliqué que celui du violon ; il se prête à moins de combinaisons.

Dans la contrebasse, la main *galope* le long du manche : il est donc à peu près impossible d'exécuter des traits rapides ; par contre, le glissando peut donner d'agréables effets.

Les instruments à cordes pincées. — *Pincer* une corde c'est l'écarter de sa position de repos et la lâcher sans vitesse initiale : la corde décrit alors autour de sa zone d'équilibre un mouvement amorti.

On peut pincer la corde soit avec un *plectre* (guitare, mandoline, banjo) soit avec le *doigt*.

Le plectre est un corps dur à bord vif, qui donne à la corde un tracé anguleux : l'étude du mouvement montre l'importance dans la sonorité du rôle joué par le point d'application du plectre. Les premiers harmoniques sont d'autant plus intenses que ce point d'application est plus éloigné du centre de la corde. Lorsque la corde est pincée par le doigt, les harmoniques sont extrêmement faibles : c'est ce qui explique le son doux et langoureux, un peu éteint de la harpe, qui s'oppose au grincement de la guitare.

Les instruments à cordes frappées : le piano (1). — Le piano est un instrument à cordes frappées dont le fonctionnement est très complexe. Il s'étend sur sept octaves du la_{-1} au la_6.

Les cordes sont au nombre de deux cent vingt environ exerçant une tension totale qui dépasse 7 t.

Elles sont tendues sur un cadre *très résistant*, le barrage BB′ formé de plaques d'acier vissées les unes sur les autres et contre lesquelles sont appliquées d'épaisses pièces de bois. Elles sont fixées d'une part à des chevilles de tension C, d'autre part à des pointes A, chevilles et pointes étant solidaires du barrage (fig. 31).

Le fond du barrage est occupé par une table d'harmonie constituée par une planche en contreplaqué, renforcée par les barres *b* et *b′*.

La partie utile de chaque corde est limitée par un sillet S, solidaire du barrage et un chevalet X, longue pièce de bois courbe collée sur la table d'harmonie à qui il transmet la vibration de la corde.

Comment s'effectue cette mise en vibration ?

Par le choc d'un marteau M feutré actionné par la touche T, par l'intermédiaire d'un pilote P.

(1) Cf. Paul Locard, *Le Piano*, collection « Que sais-je ? », n° 263.

Le rôle du bouton G est d'arrêter l'action du pilote au moment où le marteau va frapper la corde ; le rôle du ressort *r* est de replacer le pilote dans sa position primitive.

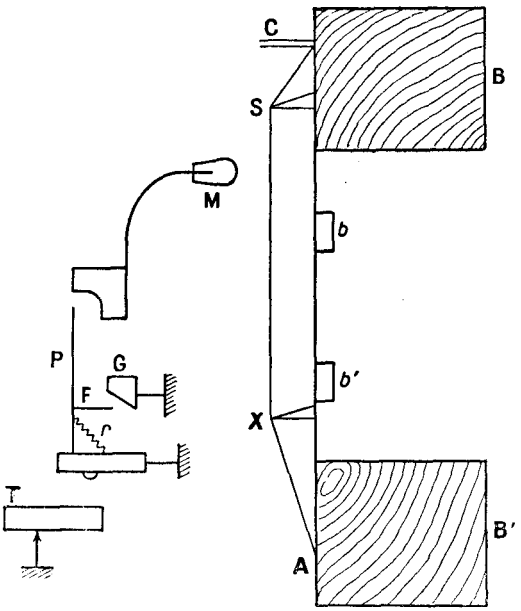

Fig. 31. — Mécanisme d'un piano (coupe)

De même, la marteau M, la touche T, sont rappelés à leur position d'équilibre.

Ainsi donc quand il frappe sur la corde, le marteau est entièrement libre.

Insistons ici sur le fait que *le pianiste ne dispose pour produire le timbre que d'une seule variable, la vitesse avec laquelle le marteau frappe la corde :* comme

dit M. Bouasse « l'art du pianiste consiste dans la mécanique des doigts (sûreté du doigté), dans la nuance, c'est-à-dire l'art de modifier l'intensité du choc : tout le reste n'est que racontar ».

Mais ce qui donne au piano son caractère vraiment unique parmi les instruments de musique, c'est la façon dont il est accordé.

En principe l'accord est fait sur le tempérament égal dans le système chromatique tempéré.

En fait, un piano n'est jamais accordé sur le tempérament égal : cette impossibilité résulte de l'extrême difficulté d'accorder un piano, *parce que les sons sont amortis*. En effet, pour accorder l'orgue par exemple, on emploie un procédé mécanique, on compte des *battements ;* avec le piano, ce n'est pas réalisable parce que les sons du piano ne sont pas tenus ; l'oreille joue donc dans l'accord un rôle essentiel et l'accordeur a tendance tout naturellement à se rapprocher bien plus de la gamme d'Aristoxène que de la gamme tempérée. L'accord se fait par *quintes*, en général *descendantes*, à partir de la_3 qui est réglé à l'unisson du diapason normal.

Il résulte de ces remarques que le passage d'une gamme à l'autre modifie le *caractère du morceau* joué, ce que tout le monde peut vérifier. On a donc, au piano, effectivement douze modes majeurs et douze mineurs, ce qui n'est pas réalisé par exemple avec l'orgue. Il est remarquable de noter que le changement d'impression est particulièrement net pour une transposition d'un *demi-ton*.

Cette particularité donne au piano une sonorité unique dont un Chopin, un Liszt, un Fauré ont tiré les plus remarquables effets.

Les perfectionnements de la mécanique et de l'électricité ont conduit certains constructeurs à substituer aux pianos ordinaires, les *pianos pneu-*

matiques et les *pianos électriques*. Le principe en est simple... La mise en action des marteaux est commandée, non pas par les doigts du pianiste, mais par un jeu de papiers perforés ou de contacts électriques sur lequel sont « inscrits » les morceaux à jouer qui s'exécutent ainsi mécaniquement.

Le passage de la perforation ou du contact correspondant à une note donnée déclanche — pneumatiquement ou électriquement — le marteau correspondant.

La sonorité de ces instruments est souvent défectueuse.

Les instruments à vent (1). — Les formules qui donnent les partiels des instruments à vent varient suivant la forme cylindrique, conique ou cylindro-conique du tuyau constitutif.

Elles mettent néanmoins toutes en évidence le fait que les partiels du tuyau ne dépendent en fin de compte que de deux facteurs :

— le numéro du partiel choisi ;

— la longueur de l'instrument.

A. Contrairement aux instruments à cordes, les instruments à vent à un seul tuyau utilisent *systématiquement* plusieurs partiels. Ceux-ci sont obtenus en principe « en forçant le vent » : lorsqu'on souffle de plus en plus fort dans un tuyau sonore, il arrive un moment où le partiel émis change brusquement ; le son paraît alors croître subitement d'une octave (ou d'un douzième) ; si l'on continue à forcer, on obtiendra le partiel 3 et ainsi de suite ; dans certains cas, on peut atteindre ainsi le douzième partiel et même plus.

Pendant l'exécution, la clarinette, le hautbois,

(1) Cf. Charles KOECHLIN, *Les Instruments à vent*, collection « Que sais-je ? », n° 267.

utilisent les trois premiers partiels ; le clairon monte jusqu'au partiel 6, les trompettes jusqu'au partiel 12. Néanmoins, les instruments à embouchure de cor présentent des anomalies dans le grave : le fondamental et le second partiel sont en général beaucoup plus graves que prévu ; ces sons sortent surtout comme sous-harmoniques des partiels plus élevés. Aussi n'utilise-t-on jamais le fondamental et presque jamais le second partiel des instruments à embouchure de cor.

Quand l'instrument a autant de tuyaux que de notes, un seul partiel est utilisé (orgue).

B. On conçoit que l'emploi des différents partiels ne suffise pas aux exécutants pour produire toutes les notes de la gamme :

— d'une part, leur nombre est toujours très réduit, par rapport au nombre de notes à jouer ;

— d'autre part, leur emploi exclusif conduirait à n'exécuter que des morceaux d'*une seule tonalité*, ce qui serait extrêmement restrictif. Aussi la variation « réelle » ou « acoustique » de la longueur du tuyau est-elle systématiquement employée. Plusieurs procédés existent :

a) *Emploi des tons.* — On appelle *tons de rechange*, des tubes additionnels qui s'intercalent entre le corps de l'instrument et l'embouchure ; ils allongent le tuyau et abaissent le partiel fondamental, d'autant plus que le ton est plus long.

C'est ainsi que le cor d'harmonie est vendu avec dix tons qui donnent les sons fondamentaux :

$$si\flat_{-1}\ ut_0\ ré_0\ mi\flat_0\ mi_0\ fa_0\ sol_0\ la\flat_0\ la_0\ si_0$$

Les plus utilisés sont les tons $ré_0$ $mi\flat_0$ mi_0 et fa_0 ; leur longueur exacte est donnée par des formules empiriques.

La trompette a six tons de rechange qui don-

nent toutes les notes par demi-tons depuis le ut_1 jusqu'au fa_1.

Le clairon, la trompette de cavalerie n'ont pas de tons de rechange qui ne sont par ailleurs utilisés que pour les instruments à embouchure de cor.

b) *Emploi des pistons et barillets.* — On voit immédiatement l'inconvénient principal que présente l'emploi des tons ; l'impossibilité de leur introduction *instantanée* pendant l'exécution d'un morceau.

Aussi s'est-on efforcé d'y remédier par des procédés mécaniques simples ; telle est l'origine des *pistons et barillets.*

Les deux figures ci-après donnent des schémas qui se suffisent à eux-mêmes (fig. 32).

Il est à noter que les tons introduits par ce procédé ne sont pas continus, mais présentent, comme il est indiqué sur la figure ci-dessus — cas du piston — une partie fixe et une partie coulissante. Celle-ci a reçu le nom de *coulisse d'accord.* Elle a un rôle double :

— permettre de purger l'instrument de l'eau qui s'y introduit normalement pendant l'exécution ;

— faciliter l'accord de l'instrument.

On utilise principalement des instruments à trois pistons ; néanmoins des instruments à six pistons de doigté plus compliqué et présentant de nombreuses combinaisons synonymes — même note émise pour des positions diverses des pistons — ont été employés. On ajoute parfois un quatrième piston aux instruments classiques.

La détermination des longueurs de tons à prévoir se fait empiriquement.

La question s'est posée de savoir si les instruments à pistons donnaient des sons aussi *beaux* que les instruments simples ; on craignait en particulier l'emploi des courbes de petits rayons

ainsi que les complications mécaniques introduites.

En fait les pistons s'usent assez vite et la sonorité de l'instrument s'altère avec le temps. Néanmoins la grande facilité du doigté conduit à faire disparaître progressivement de l'orchestre tous les

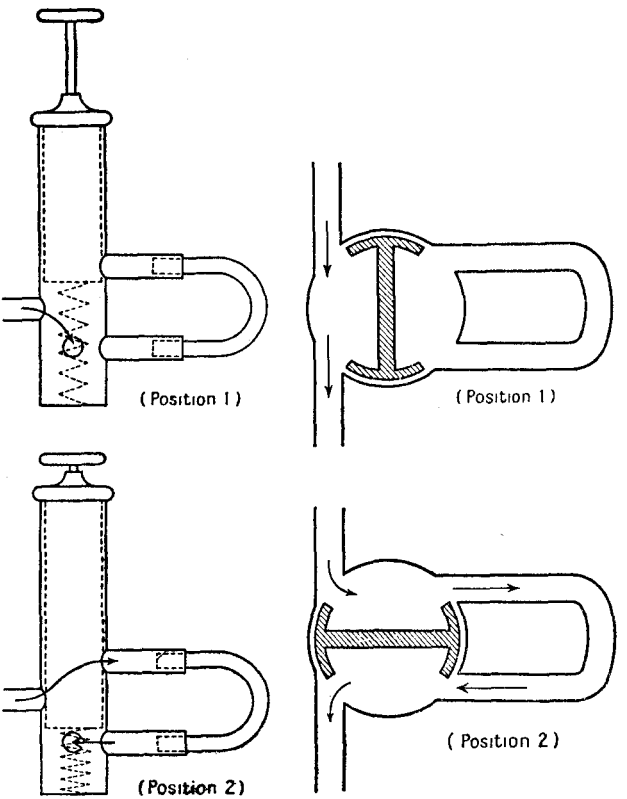

Fig. 32. — Pistons et barillets

instruments à embouchure de cor sans pistons — sauf le trombone à coulisse.

Tous les instruments appartenant à ces catégories sont cylindro-coniques.

c) *Emploi d'une coulisse mobile.* — L'un des instruments à embouchure de cor le plus puissant et le plus agréable de l'orchestre est le *trombone à coulisse*, où les tons sont remplacés par une coulisse mobile maniée à la main et qui peut allonger le cylindre que forme l'instrument de façon continue.

Il existe quatre trombones à coulisse : un alto, un ténor — seul utilisé en France — et deux basses. Chacun utilise huit partiels, ce qui permet d'obtenir suivant la position de la coulisse mobile un nombre considérable de notes.

Cet instrument est très apprécié par les musiciens, cependant il présente un certain nombre de difficultés d'exécution, résultant principalement de la lenteur relative avec laquelle peut être déplacée la coulisse mobile, ce qui limite ses conditions d'emploi.

d) *Emploi des trous.* — Très souvent, les facteurs d'instruments ont substitué à la variation de longueur réelle du tuyau la variation de sa longueur acoustique, autrement dit ils ont modifié les conditions de résonance intérieure en perçant des *trous* dans la paroi. Tel est le cas général pour les instruments à anches et à embouchures de flûtes. Tel est le cas du serpent.

Il arrive d'ailleurs que, tant à cause de leur nombre que de leur diamètre et de leur distance, les trous sont obturés ou débouchés par l'intermédiaire de dispositifs spéciaux appelés *clés*, dont l'usage remonte au XVII^{e} siècle (flûte traversière, saxophone, hautbois, etc.).

Une étude systématique du rôle des trous a été faite par divers expérimentateurs, notamment par Mahillon, Lambert et Bouasse et Fouché. Les résultats obtenus assez complexes, à apparences souvent paradoxales, peuvent se résumer ainsi :

1° L'ouverture d'un *trou* de dimension suffisante, dans la paroi latérale d'un tuyau, augmente la fréquence des partiels émis ;

2° Cette augmentation dépend non seulement de la position du trou, mais aussi de sa grandeur et du diamètre intérieur du tuyau ;

3° L'examen du tuyau vibrant prouve que l'émission de ces partiels est due à la vibration de la colonne d'air comprise entre l'orifice du tuyau et le trou ;

4° Une écoute attentive permet de percevoir en outre une autre série de partiels dus à la vibration beaucoup moins intense de la colonne d'air comprise entre le trou et l'extrémité du tuyau ; le son ainsi obtenu est dit *chuchoté*. Il n'est pas recherché, dans les instruments de musique ;

5° Les résultats précédents sont en défaut dans les cas particuliers suivants :

— si le trou est *petit* et percé au *voisinage* du milieu du tuyau (supposé octaviant), sa présence favorise l'émission du partiel n° 2 ; dans ce cas, c'est l'ensemble du tuyau qui vibre sur une seule fréquence, indépendante de la position exacte du trou : le trou est dit *octaviant ;*

— si le trou est petit et percé au voisinage du tiers du tuyau (que celui-ci soit octaviant ou quintoyant), sa présence favorise l'émission du partiel supérieur (deuxième pour le tuyau quintoyant, troisième pour le tuyau octaviant) ; dans ce cas, c'est l'ensemble du tuyau qui vibre sur une seule

fréquence, indépendante de la position exacte du trou : le trou est dit *quintoyant ;*

6° Si l'on perce un *second trou* entre le premier trou et l'extrémité du tuyau, il arrive généralement, contrairement à ce qu'une théorie trop simple laisse prévoir, que les partiels soient assez sensiblement modifiés ; cette particularité est utilisée, pour obtenir un nombre de notes supérieur au nombre des trous percés : c'est ainsi que dans la flûte, avec sept trous, on peut obtenir les douze notes de la gamme ;

7° Si l'on perce entre le second trou et l'extrémité du tuyau, un troisième, un quatrième trou, etc., la fréquence du son émis n'est plus modifiée ; il importe donc peu d'ouvrir ou d'obturer les trous plus voisins de l'extrémité du tuyau que les deux trous qui donnent la note cherchée. C'est uniquement pour une question de doigté que tel trou est maintenu fermé ou est ouvert, lors de l'émission de telle ou telle note ; presque toujours on ouvre les trous les plus voisins de l'extrémité du tuyau quelle que soit la note à jouer ;

8° L'obtention de partiels supérieurs ayant même timbre et même intensité physiologique que le fondamental est un problème délicat : on le résout empiriquement en utilisant des trous de diverses dimensions et des combinaisons de trous : c'est ainsi que dans la flûte, le trou d'octaviation n'est pas toujours utilisé pour obtenir les partiels supérieurs.

e) *Action directe des lèvres de l'exécutant.* — Rappelons enfin que toute une classe d'instruments à embouchure de cor ne présente ni pistons, ni coulisse, ni trous.

La note émise ne dépend donc en principe que du numéro du partiel utilisé. Or, pour des raisons de sonorité, la forme de ces instruments est, en

général, telle que la série des partiels émis s'écarte *toujours* — et souvent beaucoup — de la *série harmonique.*

L'exécutant ne pourrait donc que jouer *faux*, s'il n'avait la possibilité, grâce à l'action directe de ses lèvres, de modifier, dans d'importantes limites, la fréquence du son émis. C'est ainsi qu'il peut obtenir, sans difficulté (1), une série de partiels rigoureusement harmoniques.

Les instruments à anches. — La mise en vibration des instruments à vent permet de les classer en trois groupes :

— les instruments à anches ;

— les instruments à embouchures de cor ou à anches membraneuses ;

— les instruments à embouchures de flûte.

L'anche est une languette rectangulaire élastique — en métal, en roseau, etc. — encastrée suivant un de ses petits côtés et oscillant devant une ouverture par où passe un courant d'air et qu'elle obture plus ou moins.

Nous sommes conduits à distinguer immédiatement :

— l'*anche libre* de dimensions inférieures à l'orifice devant lequel elle bat et dans lequel elle peut pénétrer avec un certain jeu ; ce type d'anches est *inutilisé* dans les instruments à vent, mais constitue l'organe essentiel des instruments dits à verge vibrante (voir plus loin) ;

— l'*anche battante* qui obture périodiquement le tuyau sonore.

Une *anche battante* de tuyau d'orgue se compose d'une *rigole* et d'une lame métallique, la *languette.* La rigole est une lame de laiton qu'on estampe

(1) Mais non sans entraînement !

sur un creux de forme convenable et dont le bord doit être rigoureusement plané ; cette rigole est, au repos, incomplètement fermée par la languette, également en laiton qui peut s'appliquer sur la rigole sans dépassement (fig. 33).

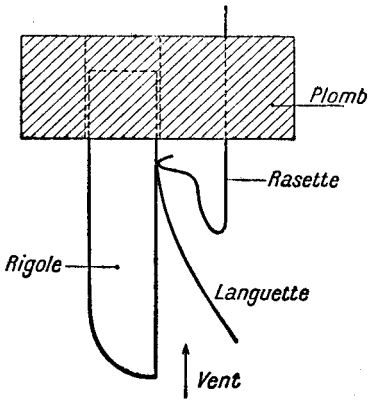

Fig. 33. — Anche battante

Le système rigole-languette entre dans un trou percé dans un lourd bloc de plomb ; la partie vibrante de la languette est déterminée par la *rasette*, gros fil de fer formant ressort, qui passe dans le bloc de plomb et appuie sur la languette par une portion courbée.

La position d'équilibre de l'anche battante est telle que sous l'action d'une force égale à la pression d'air normale soufflée dans l'instrument, elle ne ferme l'orifice qu'incomplètement.

On explique ainsi le fonctionnement de cet appareil : l'insufflation de l'air produit une double action sur l'anche :

a) La pression de l'air tend à fermer l'anche, sans l'obturer complètement ;

b) Il se produit derrière la languette une *dépression* — due à des phénomènes tourbillonnaires — qui, ajoutant à la pression extérieure, provoque la fermeture complète.

Alors, le courant d'air s'arrête, la dépression cesse, les forces élastiques provoquent la réou-

verture du tuyau, et le phénomène recommence.

On reconnaît encore l'allure générale des oscillations de relaxation ; le courant d'air mis en vibration par l'anche *entretient* le mouvement de l'air dans le tuyau par des apports périodiques d'énergie.

Les instruments à embouchure de cor. — Les *cuivres* (cor, trombone, tuba, trompette, etc.) sont constitués par un long tuyau conique ou cylindro-conique, muni à l'extrémité étroite d'une embouchure, dite *embouchure de cor.*

C'est un *bassin*, relié à un bout de tube rectiligne par un rétrécissement plus ou moins brusque (fig. 34). On le place au milieu de la bouche légèrement plus sur une lèvre que sur l'autre.

Pour émettre un son, on contracte les lèvres maintenues fermées et on appuie le bout de la langue contre la partie intérieure des lèvres.

On aspire, puis on retire brusquement la langue vers l'intérieur de la bouche, en prononçant *tu ;* c'est le *coup de langue.*

L'embouchure usuelle n'est pas indispensable ; il suffit que les lèvres s'appliquent sur un anneau plat (cas général des instruments anciens de ce type).

Dans ces instruments, les lèvres qui vibrent pendant l'exécution se comportent comme des *anches membraneuses ;* la phonation repose sur un phénomène analogue, l'anche étant alors constituée par les cordes vocales.

L'exécutant doit tenir compte des variations possibles de la tension de l'anche pendant le jeu.

C'est ainsi que pour émettre un son grave, on relâche les lèvres ; on tend d'autant plus les bourrelets élastiques formés par les lèvres que l'on veut un son plus aigu.

D'ailleurs le diamètre supérieur du bassin augmente à mesure que l'instrument est plus grave : il

peut varier de 16 mm. — bugle — à 36 mm. ou plus (bombardon).

L'étendue usuelle de l'ensemble des instruments à embouchure de cor est comprise entre *mi* $\flat_0$ et *si* $\flat_4$ soit quatre octaves et demie, mais chaque instrument a une étendue moyenne de deux octaves et demie.

Rappelons que la possibilité pour l'artiste de modifier la tension des lèvres lui permet de cor-

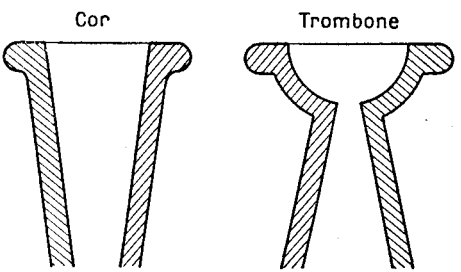

Fig. 34. — Embouchures de cor

riger, *dans de larges limites*, les partiels faux donnés par les tubes coniques et cylindro-coniques qui constituent les cuivres. La sonorité originale des sons éclatants produits justifie l'utilisation de cette catégorie d'instruments, dans les fanfares et même dans l'orchestre symphonique.

Les instruments à embouchure de flûte. — Les *sifflets* ordinaires sont des instruments à embouchure de flûte. Ils sont constitués essentiellement par un *biseau* contre lequel vient s'écraser un *jet* d'air issu d'une fente mince appelée *lumière ;* suivant la nature des instruments, biseau et lumière sont placés différemment.

La figure 35 *a)* représente l'embouchure d'un *flageolet* ou d'une *flûte à bec.*

La figure 35 *b)*, celle d'un *tuyau d'orgue* à bouche.

Le cas des *flûtes traversières* et des *fifres* est un peu plus compliqué :

Le biseau est taillé dans la paroi de l'instrument, comme dans le cas précédent, mais ce sont les *lèvres* des musiciens qui constituent la lumière. La technique du jeu est alors la suivante :

Le musicien serre les lèvres et donne un *coup de langue*, comme dans le cas des cuivres. Cette brusque sortie d'air comprimé de la bouche s'appelle *ictus*. Le son qui éclate se prolonge, tant que les poumons ne sont pas vidés.

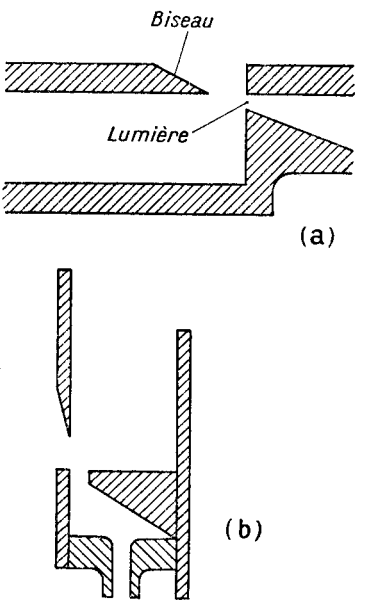

Fig. 35. — Embouchures de flûte

Les sons donnés par les instruments à embouchure de flûte sont des sons d'écoulement (sons de biseau) dont les propriétés ont été exposées ci-dessus (1).

Un instrument à vent : l'orgue. — L'orgue est le plus riche, le plus complet, le plus remarquable de tous les instruments de musique.

Il est constitué essentiellement par un nombre

(1) Voir page 84.

considérable de tuyaux — plusieurs milliers, en général — du type à anche ou à embouchure de flûte, de perces et de formes variées — cylindriques, coniques, cylindro-coniques, etc., de dimensions très différentes — leur longueur varie de 1 cm. à plusieurs mètres. Ces tuyaux sont groupés par *jeux*.

Chaque *jeu d'orgue* est composé en général de cinquante-six tuyaux — parfois soixante et un — tous accordés par demi-tons égaux, dans le système chromatique tempéré. Il s'étend donc de façon continue sur quatre et demi ou cinq octaves. Les tuyaux d'un même jeu sont tous de *même nature* à anche ou à bouche — et de *même timbre*.

Dans un orgue donc, il existe beaucoup plus de tuyaux que de notes à émettre ; chaque note peut être produite par toute une série de tuyaux.

Le principe du mécanisme de fonctionnement de l'orgue peut s'expliquer ainsi : considérons un réseau quadrillé (fig. 36). Et supposons :

— d'une part, que tous les tuyaux émettant une même note aboutissent sur une même ligne horizontale (on aura ainsi une ligne pour le ut_1, une pour le *ut* dièse$_1$...) ;

— d'autre part, que tous les tuyaux d'un même jeu aboutissent à la même ligne verticale (on aura ainsi une colonne pour le jeu n° 1, une pour le jeu n° 2...).

Pour que l'orgue fonctionne dans les conditions habituelles, il est nécessaire :

1) Que nous puissions, par un procédé quelconque, obturer tous les tuyaux des jeux que nous ne voulons pas faire parler, par exemple les jeux 3-5-6-8 de la figure ;

2) Que nous puissions exciter simultanément tous les tuyaux non obturés, donnant la note que nous voulons jouer.

Je vais décrire sommairement un des procédés

simples aujourd'hui abandonné, bien qu'il se trouve encore sur de nombreuses orgues en fonctionnement, pour réaliser ces deux conditions : c'est le procédé par *gravures* et *registres*.

Tous les tuyaux émettant une certaine note viennent déboucher sur une espèce de caisse parallélépipédique : la gravure ; l'ensemble des gravures constitue le *sommier*. Chaque gravure est alimentée en air comprimé provenant d'une soufflerie centrale par un tuyau appelé *laye ;* en temps normal,

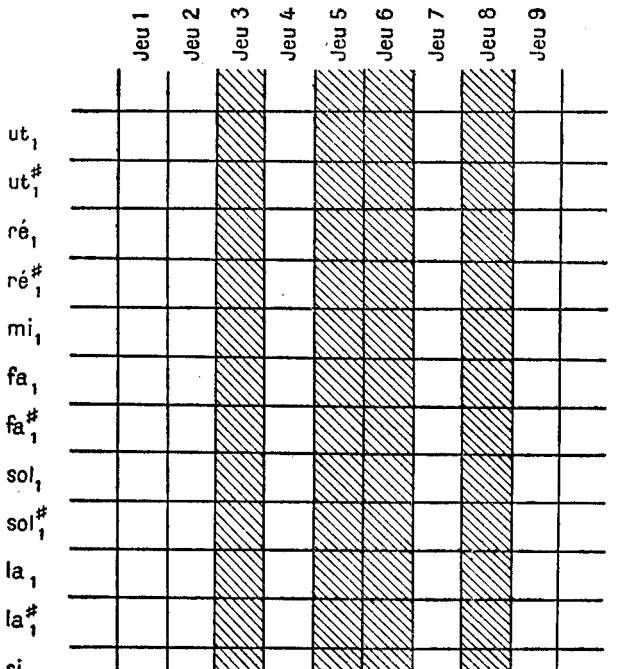

Fig. 36. — Mécanisme de fonctionnement de l'orgue

l'arrivée d'air dans la gravure est empêchée par la présence, à l'extrémité de la laye, d'une *soupape*, qui est commandée par une touche, placée sur un des claviers. Quand l'exécutant appuie sur une touche, la soupape s'ouvre et l'air comprimé se précipitant dans la gravure excite les tuyaux donnant la note cherchée.

Pas tous, cependant, car entre les tuyaux et la gravure et perpendiculairement au plan de leurs axes, on peut déplacer des *registres* : ce sont de simples planches de bois, une par jeu d'orgue, percée d'autant d'ouvertures que le jeu a de tuyaux.

En temps normal, ces ouvertures ne sont pas en face des extrémités correspondantes des tuyaux ; ceux-ci sont donc obturés et l'air comprimé arrivant dans la gravure ne peut les exciter.

Pour faire parler les jeux qu'il désire, l'organiste doit, préalablement à l'exécution, tirer les *boutons-poussoirs* placés devant lui, sur lesquels sont écrits les noms des jeux : « Principal », « Violon », « Tuba », etc.

Chaque bouton-poussoir commande le déplacement d'un registre ; quand il est tiré, les ouvertures du registre sont placées en face des extrémités correspondantes des tuyaux du jeu que rien n'empêche plus de parler quand l'abaissement de la touche précipite l'air comprimé dans la gravure correspondante.

L'organiste est donc conduit à exécuter une double opération :

— « préparer » préalablement les jeux qu'il désire faire entendre ;

— appuyer sur les touches, sans plus se préoccuper des jeux.

1° C'est le nombre et la qualité des jeux qui fait essentiellement la valeur d'un orgue. On a coutume de classer ces jeux de deux façons différentes.

— d'une part, *par leur hauteur :* on désigne, conventionnellement chaque jeu d'après *la longueur exprimée en pieds et en pouces du tuyau ouvert donnant la note la plus grave du jeu ;* les jeux les plus courants sont les jeux de *huit pieds*, commençant à l'ut_1 ; les jeux les plus graves, ceux de 32 pieds (d'ailleurs exceptionnels) ; les jeux les plus aigus ceux de un pied (jeu de *piccolo*) ;

— d'autre part, par leur *sonorité :* on a pu grouper les jeux d'orgue en cinq catégories : jeux de *principal* (timbre du cor d'harmonie), famille des *violons*, famille des *flûtes*, jeux bouchés *(quintatons* ou *bourdons)*, jeux d'anches, extrêmement variés donnant des timbres très divers (trompettes, hautbois, etc.).

Ces jeux peuvent être accouplés accidentellement ou en permanence, ce qui donne un nombre immense de combinaisons réalisables.

2° Comment utiliser pratiquement les possibilités que donne à l'exécutant l'existence des jeux ? L'idéal serait évidemment de pouvoir, à chaque instant :

— grouper les jeux *de façon arbitraire ;*

— changer *instantanément* ce groupement.

Pour tourner la difficulté, on utilise plusieurs *claviers* en associant à chacun d'eux, les jeux de même caractère, de même emploi général : il existe au maximum cinq claviers manuels et un clavier à pied ou pédalier.

Bien entendu, l'organiste a la possibilité de rendre deux ou plusieurs claviers solidaires,de transférer un groupe de jeux d'un clavier à un autre, etc.

3° Le problème le plus délicat que doit résoudre le facteur d'orgue est celui de la *transmission :* l'exécution n'est en effet possible que si l'abaissement des touches provoque presque instantanément le son. Or les dimensions des orgues sont

telles que l'on doit renoncer à une transmission purement mécanique. On utilise aujourd'hui des procédés *électro-pneumatiques* qui ont succédé aux procédés purement pneumatiques.

Remarquons que, contrairement au pianiste, l'organiste ne peut obtenir l'*expression* (fortissimo à pianissimo), en appuyant plus ou moins sur les touches qui fonctionnent par tout ou rien : l'utilisation de *boîtes d'expression*, véritables boîtes fermées par des volets qu'on ouvre plus ou moins et dans lesquelles on place les tuyaux permet d'obtenir assez grossièrement et sans souplesse les piano et les forte.

Par contre l'exécutant a la possibilité de tenir *indéfiniment* une note, ce qui est unique dans tous les instruments de musique.

Mais ce qui est surtout remarquable, dans l'orgue, c'est la possibilité d'étudier séparément chaque tuyau donc chaque note, ce qui permet d'obtenir une *incomparable perfection de toutes les sonorités.*

Les instruments à verges vibrantes. — En général les verges vibrantes sont montées comme des anches libres. Comme elles ne sont à l'origine d'aucun tuyau sonore, c'est leurs fréquences propres qui déterminent les hauteurs des sons produits.

Parmi les instruments à verge vibrante, il faut signaler l'*harmonium*, dont le principe est imité de l'orgue. C'est ainsi que suivant la forme et les dimensions de la languette vibrante, la sonorité change ; on obtient ainsi divers jeux dans les mêmes conditions que les jeux d'orgue.

Mais contrairement à l'orgue, l'harmonium est *expressif*, car la fréquence d'une anche libre est à peu près indépendante de la force du vent et en agissant directement sur les soufflets commandés au moyen des pieds, l'artiste peut modifier (d'ailleurs dans des limites étroites) l'intensité du son.

Par contre la sonorité de l'harmonium ne peut se comparer en aucune façon à celle de l'orgue.

L'*accordéon* et l'*harmonica* utilisent le même principe.

Les instruments à plaques vibrantes. — Donnons quelques résultats expérimentaux sur les cloches, types des instruments à plaque vibrante.

Les cloches sont coulées en *bronze ;* elles ont une forme bien connue, fixée depuis des siècles ; le rapport hauteur/diamètre est toujours égal à 4/5.

Le son fourni par les cloches donne lieu à un phénomène curieux : *l'impression de hauteur que ressent l'auditeur est une octave au-dessous du partiel 5 (appelé nominal) de la cloche.*

Il arrive généralement que cette note, appelée « principale » ne soit pas un partiel de la cloche. M. Bouasse pense que cette note est vraisemblablement le partiel 5 avec une erreur d'une octave.

« Voici, dit-il, ce qui rend l'erreur plus facile.

« Le partiel 5 semble avoir son maximum d'intensité aussitôt le coup frappé sur la cloche ; les partiels 2 et 3 ne s'entendent qu'après. Le partiel 5 attire d'abord l'attention ; mais bientôt les partiels 2 et 3 augmentent le volume du son *en lui imposant un caractère plus grave :* d'où la hauteur subjective liée au partiel 5, mais avec une erreur d'une octave liée à la présence des sons plus graves qui sont d'intensité comparable. »

Marsenne a trouvé expérimentalement que les *fréquences des partiels d'une cloche sont en raison inverse de la racine cubique de son poids.*

Les cloches de 250 kg. donnent comme « principale » la note si_3, les cloches les plus lourdes (17 t.) donnent le si_1 (cathédrales de Sens, Rouen, Saint-Pierre de Rome et Notre-Dame de Paris).

Instruments de musique modifiés pour le microphone. — Les sujétions d'ordre technique qu'imposaient les appareils utilisés pour l'enregistrement, la radiodiffusion, ne permettaient pas de transmettre correctement les fréquences très aiguës (supérieures à 8.000 pér. p. sec.).

Comme certains instruments et des plus importants (violon, violoncelle, trombone, trompette, saxophone, clarinette, hautbois, flûte, etc.) ont des harmoniques très perceptibles d'une fréquence plus élevée, il en résultait qu'il n'était pas possible de transmettre ces instruments, *avec leur timbre*, par les procédés électro-acoustiques courants.

Certains musiciens, gênés de ne pas entendre la sonorité d'un violon, quand le speaker annonce un concerto pour violon, ont pensé qu'il était préférable de substituer à cet instrument un autre instrument de *timbre voisin*, de jeu identique, mais ne possédant, *par construction*, aucun harmonique supérieur à 8.000 pér. p. sec. par exemple. Divers instruments ainsi modifiés pour le microphone ont été construits et utilisés, notamment en Allemagne.

Il ne semble pas, jusqu'à maintenant, que leur emploi ait eu tendance à se généraliser, d'autant plus que, la technique se perfectionnant chaque jour, la transmission des fréquences très aiguës devient possible.

D) La musique électronique

Il nous faut signaler, pour terminer cet exposé, les très intéressantes tentatives qui se poursuivent d'ailleurs actuellement, d'utiliser les propriétés des circuits électriques pour *créer des timbres musicaux nouveaux*, ou tout au moins pour avoir la possibilité, comme dans l'orgue, de *passer facilement d'un timbre à un autre*. La musique ainsi obtenue a pris le nom de « musique électronique ».

Il s'agit d'ailleurs d'une technique encore dans l'enfance, mais dont les développements sont à suivre, car elle a déjà produit deux appareils tout à fait remarquables : l'*orgue Hammond* et surtout les *ondes musicales Martenot.*

Ondes musicales Martenot. — L'appareil est constitué essentiellement par un *oscillateur électrique*, dont les oscillations actionnent des haut-parleurs qui diffusent le son : on obtient ainsi une échelle complète de sonorités s'étendant de 16 à 12.000 périodes par seconde.

En pratique, deux procédés sont utilisés :

1° Le réglage de la note se fait par la variation de la capacité d'un condensateur, dont l'armature fixe est formée par un ensemble de lames métalliques en forme de peigne, chacune de ces lames donnant une note, et dont l'armature variable est commandée par un *ruban*, lui-même déplacé par le musicien qui passe son doigt dans un onglet.

Le musicien règle la fréquence à l'aide de cet onglet tenu par la main droite ; à l'aide de la main gauche, il agit sur une sorte de pédale qui commande l'intensité sonore. Un léger mouvement de la main droite autour de la position normale permet d'obtenir un effet de « vibrato » ;

2° On peut utiliser aussi pour faire varier la note, la variation de self-induction des bobinages. Ceux-ci présentent toute une série de prises intermédiaires actionnées par les notes placées sur un clavier ; ce clavier, très léger est susceptible de déplacements latéraux agissant sur un condensateur variable et provoquant le « vibrato ».

Dans les deux cas, on peut facilement obtenir non seulement le demi-ton, mais le *quart de ton*, ce qui répond à une préoccupation des musiciens de l'école moderne.

Ajoutons que des clefs permettent de brancher des filtres qui peuvent modifier le timbre, à peu près à volonté : l'instrument possède ainsi une gamme de sonorités très complètes.

Orgue Hammond. — C'est un appareil beaucoup plus compliqué, comportant plusieurs circuits oscillants. Le réglage du timbre présente une certaine originalité : on agit, à l'aide de clés sur la durée d'établissement ou de cessation de la note, et également sur le nombre des harmoniques et sur leurs intensités : on peut ainsi obtenir des sons particulièrement « brillants » et d'autres, très « sourds ». Une pédale d'intensité fait varier le volume sonore.

Autres appareils électroniques. — D'autres systèmes, moins bien réussis que les précédents, utilisent aussi les procédés électroniques.

Citons d'abord les appareils qui partent des instruments classiques, à vent ou à corde, et qui se contentent d'amplifier et de filtrer les sonorités obtenues pour les modifier : en recueillant à l'aide d'un pick-up les vibrations du chevalet d'un violon, on peut les déformer et obtenir des timbres d'alto ou de violoncelle ; l'orgue radiosynthétique de l'abbé Puget n'utilise qu'un nombre très réduit de tuyaux ; à noter également l'orgue photoélectrique de Toulon, utilisant pour former les sons des disques percés de rangées de trous concentriques, éclairés par un faisceau lumineux.

D'autres techniciens ont cherché, comme M. Martenot, à créer des sons, soit par des oscillateurs (orgue Givelet), soit par synthèse totale (appareil Sarnette).

Dans un genre un peu différent, on peut indiquer le *Voder*, étudié par la « Bell Telephone », qui permet la reproduction synthétique de la

parole ; un opérateur bien entraîné peut à l'aide d'un ensemble de pédales et de clavier, composer des monosyllabes, des mots et même des phrases : c'est encore un appareil de laboratoire.

Signalons également les essais de bruitage synthétique stylisés effectués par la Radiodiffusion française : des effets de mer, de tempête, de tonnerre, des sensations plus subtiles, telles que le chaud et le froid, ont pu être ainsi remarquablement rendus.

Le phonogène. — Le phonogène de P. Schaeffer vise à l'universalité. Il permet de créer tel son que l'on désire, en jouant sur tous les éléments constitutifs : amplitude, fréquence, forme, allure des transitoires... Ce n'est pas à proprement parler un instrument de musique ; d'emploi délicat, il sert à fournir les matériaux de base de la musique concrète.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

HELMHOLTZ, *Théorie Physiologique de la Musique*, Masson, 1868.
RAYLEIGH, *Theory of Sound* (2 vol.), Macmillan C°, 1895, réédité en 1929.
BOUASSE, *Les Phénomènes vibratoires de la Matière* (12 vol.), Delagrave.
CRANDALL, *Theory of vibrating systems and sound*, Van Nostrand C°, 1927.
LE CORBEILLER, *Electroacoustique*, Chiron, 1934.
FOCH, *Acoustique*, Armand Colin, 1934.
MORSE, *Vibration and Sound*, McGraw Hill C°, 1936.
MATRAS, *Technique de la Radiodiffusion et de la Télévision*, Eyrolles, 1937.
JEANS, *Science et Musique*, Hermann, 1937.
ROCARD, *Dynamique générale des vibrations*, Masson, 1943.
ROCARD, *Electroacoustique*, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (E. N. S. T.), 1944.
CHAVASSE, *Mesures acoustiques et téléphonométrie*, E. N. S. T., 1944.
CAUSSÉ, *L'Acoustique Physiologique*, E. N. S. T., 1944.
MATRAS, *L'Acoustique Instrumentale*, E. N. S. T., 1944.
BRILLOUIN, *L'Acoustique Architecturale*, E. N. S. T., 1944.
MATRAS, *L'Acoustique appliquée* (2 vol.), E. N. S. T., 1948.
KINSLER et FREY, *Fondamentals of Acousties*, Wiley and Son, 1950.
JOB, *Oscillations électriques et applications acoustiques*, E. N. S. T., 1952.
Revue d'Acoustique.
The Journal of Acoustical Society of America (J. A. S. A.).
Akustishe Zeitschrift.
Acoustica.

TABLE DES MATIÈRES

PAGES

INTRODUCTION 5

CHAPITRE PREMIER. — **Propagation du son** 7

A) *Propriétés physiques des ondes sonores*, 7. — B) *Sons musicaux*, 20.

CHAPITRE II. — **Perception du son** 33

A) *L'oreille*, 33. — B) *L'intensité du son*, 40. — C) *Hauteur du son et gammes*, 44. — D) *Les sons inaudibles*, 63. — E) *L'acoustique psychophysiologique*, 64.

CHAPITRE III. — **Production du son** 69

A) *Les systèmes producteurs de son*, 69. — B) *La voix*, 86. — C) *Les instruments de musique*, 89. — D) *La musique électronique*, 124.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE 127

1957. — Imprimerie des Presses Universitaires de France. — Vendôme (France)

ÉDIT. N° 24 489 IMP. N° 14 624

EXTRAIT DU CATALOGUE DE LA COLLECTION

Nos 501 à 600

501. **Le costume antique et médiéval** (M. Beaulieu).
502. **Le transformisme** (J. Carles).
503. **Les littératures de l'Inde** (L. Renou).
504. **L'art radiophonique** (R. Pradalié).
505. **Le costume moderne et contemporain** (M. Beaulieu).
506. **L'alchimie** (S. Hutin).
507. **Histoire de la Champagne** (M. Crubellier et Ch. Juillard).
508. **L'astrologie** (P. Couderc).
509. **Histoire de Malte** (J. Godechot).
510. **Le cuivre et le nickel** (G. Cohen).
511. **La spectroscopie** (J. Terrien).
512. **Le Grand Nord** (P. del Pérugia).
513. **L'Amérique Centrale** (Ch. V. Aubrun).
514. **La notation musicale** (A. Machabey).
515. **Les sociétés secrètes** (S. Hutin).
516. **Les Antilles françaises** (J. Pouquet).
517. **La musique française contemporaine** (Cl. Rostand).
518. **Le cœur et ses maladies** (P. Chauchard).
519. **Les roches** (A. Cailleux).
520. **La Troisième République** (P. Bouju et H. Dubois).
521. **La géométrie descriptive et ses applications** (A. Delachet et J. Moreau).
522. **Histoire de Venise** (F. Thiriet).
523. **Les glandes endocrines** (R. Kehl).
524. **Les fermentations** (E. Aubel).
525. **La géologie** (A. Cailleux).
526. **L'hydrogène** (A. Ricci).
527. **Langue et littérature bretonnes** (F. Gourvil).
528. **Les mécanismes de la vision** (E. Baumgardt).
529. **Madagascar** (O. Hatzfeld).
530. **Les quanta et la vie** (A. Goudot).
531. **L'économie de l'Inde** (M.-S. Renou).
532. **Le feu** (A. Faure et R. Beltramelli).
533. **L'urbanisme souterrain** (E. Utudjian).
534. **L'épigraphie latine** (R. Bloch).
535. **La vie préhistorique** (R. Lantier).
536. **La diplomatique** (G. Tessier).
537. **La filature** (R. Thiébaut).
538. **La neige** (Ch.-P. Péguy).
539. **Histoire de la Turquie** (R. Mantran).
540. **La houille blanche** (G. Thaller).
541. **L'attention et ses maladies** (A. Bal).
542. **Les roches éruptives** (Ch. Pomerol et R. Fouet).
543. **L'aluminium et les alliages légers** (J. Lanthony).
544. **L'art oratoire** (J. Senger).
545. **Les mentalités** (G. Bouthoul).
546. **Le tissage** (R. Thiébaut).
547. **Le vol à voile** (M. Vermot-Gauchy).
548. **Les maîtres du jazz** (L. Patte).
549. **L'éveil politique africain** (H. Deschamps).
550. **L'hérédité humaine** (J. Rostand).
551. **Les premiers chrétiens** (M. Simon).
552. **Les chiens** (Ed. Dechambre).
553. **L'iconographie chrétienne** (M. Pacaut).
554. **Pirates et flibustiers** (H. Deschamps).
555. **La sensation** (H. Piéron).
556. **Les invasions barbares** (P. Riché).
557. **La productivité** (J. Fourastié).
558. **La peau** (P. Blum).
559. **La navigation aérienne** (G. Coutaud et L. Andlauer).
560. **La littérature grecque moderne** (A. Mirambel).
561. **L'acier** (J. Ferry et R. Chatel).
562. **La glace et les glaciers** (V. Romanovsky et A. Cailleux).
563. **L'enfance délinquante** (J. Chazal).
564. **Courbes et surfaces** (J. Taillé).
565. **L'équilibre sympathique** (P. Chauchard).
566. **Les tissus d'art** (M. Beaulieu).
567. **Les civilisations précolombiennes** (H. Lehmann).
568. **La tauromachie** (J. Testas).
569. **Les mouvements des végétaux** (P.-E. Pilet).
570. **La linguistique** (J. Perrot).
571. **Les nombres premiers** (E. Borel).
572. **Les méthodes en pédagogie** (G. Palmade).
573. **La Haute-Asie** (L. Hambis).
574. **Histoire du Mexique** (F. Weymuller).
575. **Les Papes de la Renaissance** (H. Marc-Bonnet).
576. **Les sensations chez l'animal** (E. Baumgardt).
577. **La guerre** (G. Bouthoul).
578. **Histoire de la Grèce moderne** (N. Svoronos).
579. **La mécanique des solides** (J.-L. Destouches).
580. **Les Tsiganes** (J. Bloch).
581. **La Commune** (G. Bourgin).
582. **La mythologie grecque** (P. Grimal).
583. **L'énergie chlorophyllienne** (J. Carles).
584. **Histoire de la médecine vétérinaire** (A. Senet).
585. **Le syndicalisme en France** (G. Lefranc).
586. **Les toxicomanies** (A. Porot).
587. **Le thomisme** (P. Grenet).
588. **La céramique grecque** (H. Metzger).
589. **L'exploration sous-marine** (P. Diolé).
590. **Biogéographie mondiale** (A. Cailleux).
591. **Histoire de la Pologne** (A. Jobert).
592. **Les pierres précieuses** (N. et A. Metta).
593. **Histoire des idées en France** (R. Daval).
594. **Le paludisme** (F. Pagès).
595. **Les roches sédimentaires** (Ch. Pomerol et R. Fouet).
596. **La vie à Rome dans l'Antiquité** (P. Grimal).
597. **L'Afrique occidentale française** (J. Pouquet).
598. **L'administration régionale et locale de la France** (H. Detton).
599. **La résistance des matériaux** (A. Delachet).
600. **L'art du comédien** (A. Villiers).

Que sais-je ?

Collection dirigée par Paul Angoulvent

Derniers titres parus

676. **Le siècle d'Auguste** (P. Grimal).
677. **L'homéopathie** (P. Vannier).
678. **Histoire de la Hongrie** (E. Tersen).
679. **Les protéines** (M. Lévy).
680. **La raison** (G.-G. Granger).
681. **Le canal de Suez** (H. Poydenot).
682. **Les montagnes** (R. Fouet et Ch. Pomerol).
683. **Les conserves** (F. Lery).
684. **La guérison** (J. Sarano).
685. **L'orthographe** (P. Burney).
686. **La république romaine** (A. Clerici et A. Olivesi).
687. **L'univers** (P. Couderc).
688. **Histoire de la Touraine** (P. Leveel).
689. **Albigeois et Cathares** (F. Niel).
690. **Histoire du droit pénal** (R. Charles).
691. **Les thérapeutiques psychiatriques** (H. Baruk).
692. **La trigonométrie** (R. Campbell).
693. **Géopolitique et géostratégie** (P. Célérier).
694. **Le mysticisme** (H. Sérouya).
695. **Les entreprises nationalisées** (B. Chenot).
696. **Sociétés animales, société humaine** (P. Chauchard).
697. **La consommation** (M. Lengellé).
698. **Le langage et la pensée** (P. Chauchard).
699. **Marchands et banquiers du moyen âge** (J. Le Goff).
700. **L'argot** (P. Guiraud).
701. **L'opinion publique** (A. Sauvy).
702. **Le droit musulman** (R. Charles).
703. **Les engrais et la fumure** (S. Pontailler).
704. **Histoire des pays scandinaves** (P. Jeannin).
705. **L'acupuncture** (R. de La Fuÿe).
706. **Proverbes et dictons français** (J. Pineaux).
707. **La philosophie chinoise** (Chow Yih-Ching).
708. **La bibliographie** (L.-N. Malclès).
709. **La spéléologie** (F. Trombe).
710. **La littérature japonaise** (R. Bersihand).
711. **Histoire de demain** (J. Fourastié et C. Vimont).
712. **La bureaucratie** (A. Sauvy).
713. **La guerre psychologique** (M. Mégret).
714. **L'industrie automobile** (J. Pierjant).
715. **La littérature italienne** (P. Arrighi).
716. **L'énergie végétale** (P.-E. Pilet).
717. **Les poussières** (A. Assailly).
718. **Les Berbères** (G.-H. Bousquet).
719. **La faim** (R. Masseyeff).
720. **La politique économique** (J. Billy).
721. **Les hélicoptères** (H. Beaubois).
722. **Les Arabes** (V. Monteil).
723. **L'automation** (L. Salleron).
724. **Robespierre** (M. Bouloiseau).
725. **L'au-delà** (F. Grégoire).
726. **Le bilan dans les entreprises** (L. Petit).
727. **La vie sexuelle** (P. Chauchard).
728. **Histoire de la Sicile** (J. Huré).
729. **Les rayons cosmiques** (A. Cachon, L. Jauneau et A. Daudin).
730. **Le Chili** (R. Avalos).
731. **L'analyse biochimique médicale** (A. Galli et R. Leluc).
732. **Histoire de la psychologie** (M. Reuchlin).
733. **La fatigue** (P. Chauchard).
734. **Rythmes et cycles biologiques** (A. Reinberg et J. Ghata).
735. **Histoire des doctrines militaires** (F. Schneider).
736. **La Sibérie** (L. Hambis).
737. **L'homme contre l'animal** (R. Fiasson).
738. **Biologie sociale** (G. Bouthoul).

ÉDIT.
24.489

1956 – Imp. Presses Universitaires de France - Vendôme (France)